

**CARACTERIZACION DE RESIDUOS DE MINERIA DEL YESO PARA EVALUAR  
LA REACTIVIDAD ALCALI-AGREGADO**

**YENY PAOLA PACHECO SARABIA  
MARCELA PAOLA RINCON VALERO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICA  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2013**

**CARACTERIZACION DE RESIDUOS DE MINERIA DEL YESO PARA EVALUAR  
LA REACTIVIDAD ALCALI-AGREGADO**

**AUTORAS:**

**YENY PAOLA PACHECO SARABIA**

**MARCELA PAOLA RINCON VALERO**

**Trabajo de Grado para optar al Título de Geólogas**

**DIRECTOR:**

**CARLOS ALBERTO RIOS REYES**

**Geólogo PhD.**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **DEDICATORIA**

*A Dios y a mis padres.*

*A mi sobrino Juan Diego.*

***Yeny Paola***

*A mi esposo Óscar*

*A mi hijo Jerónimo*

*A mis padres*

***Marcela Rincón***

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios por bendecir y conducir cada uno de mis pasos.*

*A mis padres Abel Pacheco Jiménez y Marilse Sarabia Rodríguez por su comprensión y amor.*

*A mis hermanos Yurby, Fabián, Karina, Diego y Said por su incondicionalidad e impulso en aquellos días grises; a mis sobrinos Juan Diego, Sofía y Simón por motivar mis esfuerzos con su sonrisa.*

*A Marcela por su amistad, acompañamiento y apoyo.*

*A mis amigos Jennyfer, Erick, Yineth, Ana María, Alejandra y María Isabel por brindarme su abrazo y cariño.*

*A Doña Carmen de Rey, Ana Lucia y sus hijos por convertirse en mi familia lejos de casa.*

*Al profesor Carlos Ríos por su guía y consejo.*

*A CEMEX y a los Laboratorios de Suelos, microscopia Electrónica de Barrido, Difracción de Rayos X y petrografía de la Universidad por su disposición y desinteresada colaboración.*

*A la UIS, a la Escuela de Geología y sus profesores, por aportar con mí desarrollo académico y personal.*

*Finalmente a todas las personas que estuvieron involucradas y que contribuyeron de una u otra forma con el logro de esta meta.*

**Yeny Paola**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios por ser mi guía espiritual y acompañarme en cada uno de mis caminos.*

*A mis padres Marleny Valero y Humberto Rincón por ser mi apoyo desde que comencé mi carrera universitaria.*

*A mi esposo por su infinito amor y comprensión.*

*A mis amigos y compañeros de la universidad en especial a Yeny Pacheco.*

*A la escuela de Geología y sus profesores por brindarme las herramientas para mi desarrollo como persona y profesional.*

**Marcela Rincón.**

## TABLA DE CONTENIDO

Introduccion .....	20
1. Objetivos.....	22
1.1 Objetivo General.....	22
1.2 Objetivos Específicos.....	22
2. Antecedentes.....	23
3. Marco Teorico.....	26
3.1 La Minería Del Yeso .....	29
3.1.1 El Yeso .....	29
3.1.1.2 Aplicaciones.....	32
3.1.2 Residuos De La Minería .....	33
3.1.1.1 Residuos De La Minería Del Yeso.....	34
3.1.1.1.1 Las Lutitas .....	35
3.2 El Alkali Y Los Agregados.....	39
3.2.1 La Reactividad Álcali – Agregado .....	39
3.4 Impacto Ambiental Generado Por Los Residuos De Minería.....	52
4. Metodologia .....	55
4.1 Fase De Recolección Bibliográfica: .....	55
4.2 Fase De Recolección Del Material Objetivo De Estudio: .....	55
4.3 Fase De Preparación De Las Muestras:.....	56
4.3.1 Probetas Experimentales.....	56
4.3.2 Pruebas Para Caracterización Química.....	56

4.3.3 Secciones Delgadas .....	56
4.4 Fase De Caracterización Mineralógica Y Petrográfica:.....	57
4.5 Fase De Caracterización Química: .....	57
4.6 Fase De Preparación De Probetas Experimentales: .....	57
4.7 Fase De Realización De Pruebas Físicas, Mecánicas Y Químicas Del Concreto A Bases De Residuos De La Minería Del Yeso:.....	58
4.8 Fase De Integración De La Información E Interpretación De Los Resultados .....	58
4.9 Fase De Elaboración Del Informe Final: .....	58
5. Resultados .....	59
5.1 Contextualización De La Mina El Diviso .....	59
5.1.1 Localización Geográfica.....	60
5.2 Generalidades:.....	61
5.4.1 Generalidades .....	74
5.4.2 Resultados De Las Pruebas .....	75
5.5 Análisis De Resultados De Ensayos De Microscopia Electrónica De Barrido (Sem) .....	79
5.6 Resultados De La Aplicación De Tecnicas Analíticas De Gravimetría Para La Muestra De Lutita No Fisil.....	90
5.6.1 Tecnicas Analíticas De Gravimetria .....	90
5.7 Análisis De Resultados De Ensayos De Resistencia.....	97
6. Conclusiones .....	109
7. Recomendaciones .....	112
Bibliografía .....	113
Anexos.....	116

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Thomas Stanton Apoyado En Una Pared En La Que Se Observa El Efecto De La Reacción Alkali-Silice. ....	23
Figura 2: Imagen Del Yeso. ....	30
Figura 3. Proceso De Extracción Del Yeso. ....	31
Figura 4: Aplicaciones Del Yeso: A) Aplicaciones En La Medicina, B) Aplicación En La Decoración, C) Aplicación En La Construcción, D) Aplicación En La Cerámica. ....	33
Figura 5. Residuos De La Minería Del Yeso. En La Mina “El Diviso” En La Mesa De Los Santos. ....	35
Figura 7: Lutitas. ....	37
Figura 6: Fases De Desarrollo De La Reacción Álcali Agregado. ....	40
Figura 7: Fisuración, Cerramiento De Juntas Y Dislocación Lateral Causadas Por La Severidad De La Reacción Álcali- Agregado En Un Muro De Parapeto. ....	41
Figura 8: Niveles De Formación De Las Fisuras Debido A Las Tensiones Internas ....	47
Figura 9: Entrada A La Mina El Diviso. ....	60
Figura 10: Afloramiento De Los Tipos De Materiales Encontrados En La Mina, La Fotografía Fue Tomada De Un Afloramiento De Roca Fresca (Dentro De La Mina), La Oscuridad En La Imagen Se Debe A La Falta De Luz Dentro De La Mina. Se Hace Una Correlación Con La Columna Estratigráfica De La Mina Con El Afloramiento Del Que Se Obtuvo El Registro Fotográfico. ....	62
Figura 11: Botadero Del Material Estéril Ubicado A Las Afueras De La Mina. ....	63
Figura 13: A) Cortadora Marca Minesecar 2, Row-Ratheno. B) Pulidora Para Alúmina Marca Montasupal. C) Pulidora Marca Buehler Ltd. D) Horno De Secado Marca Buehler Ltd. ....	66
Figura 14: Proceso De Elaboración De Secciones Delgadas. A) Se Pule La Muestra Hasta Obtener Una Superficie Lisa. B) Se Introduce En El Horno. C) Se	

Pule La Muestra Para Poder Ponerle El Vidrio. C) Se Pega El Vidrio Para Seguir El Proceso De Pulido Y Llevar La Sección A Un Valor Igual O Cercano De 2 Micras. ....	67
Figura 15. Microscopio De Luz Transmitida Marca Nikon Eclipse E200/50po Con Cámara Y Pantalla Incorporada Los Cuales Se Utilizaron Para Describir Las Secciones. ....	68
Figura 16. Representación Esquemática De La Ley De Bragg.....	73
Figura 17. Imagen Con Enfoque En El Elemento En El Que Se Realiza El Examen De Composición. ....	81
Figura 18. Imagen Con Enfoque En El Elemento En El Que Se Realiza El Examen De Composición. ....	83
Figura 19. Imagen Con Enfoque En El Elemento En El Que Se Realiza El Examen De Composición. ....	84
Figura 20. Imagen Con Enfoque En El Elemento En El Que Se Realiza El Examen De Composición. ....	86
Figura 21. Imagen Con Enfoque En El Elemento En El Que Se Realiza El Examen De Composición. ....	87
Figura 22. Imagen Con Enfoque En El Elemento En El Que Se Realiza El Examen De Composición. ....	89
Figura 23: Trituradora De Mandíbulas Marca Bb 200 Retsch.....	97
Figura 24: Proceso De Elaboración De Las Probetas Experimentales. ....	98
Figura 25: Pruebas De Resistencia A La Compresión Realizadas A Las Probetas Experimentales. ....	99

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición De Las Rocas Sedimentarias Y Características Como Agregados Pétreos. ....	28
Tabla 2. Propiedades Composicionales Y Texturales De Las Lutita. ....	38
Tabla 3: Minerales, Rocas Y Materiales Sintéticos Que Pueden Ser Potencialmente Reactivos Con Los Álcalis Del Cemento. ....	42
Tabla 4: Causas Y Mecanismos Del Deterioro Del Hormigón Por La Reacción Álcali – Sílice. ....	48
Tabla 5: Efectos Medioambientales De Las Actividades Mineras.....	53
Tabla 6: Nomenclatura Asignada A Las Muestras Recolectadas En La Mina “El Diviso”.....	59
Tabla 7: Análisis De La Sección Delgada Correspondiente A La Muestra Yp1 (Lutita).....	69
Tabla 8: Análisis De La Sección Delgada Correspondiente A La Muestra Yp2 (Lutita).....	70
Tabla 9: Análisis De La Sección Delgada Correspondiente A La Muestra Yp3 (Yeso).....	71
Tabla 10: Condiciones De Los Materiales (Yeso, Lutita) Para La Toma De Datos De Difracción. ....	74
Tabla 11: Fases Minerales Presentes En La Muestra De Lutita Compacta.....	75
Tabla 12. Fases Minerales Presentes En La Muestra De Lutita Fisil.....	77
Tabla 13: Fases Minerales Presentes En La Muestra De Yeso.....	78
Tabla 14: Elemento, Porcentaje En Peso Y Atómico De Dicho Elemento. ....	82
Tabla 15: Elemento, Porcentaje En Peso Y Atómico De Dicho Elemento .....	84
Tabla 16: Elemento, Porcentaje En Peso Y Atómico De Dicho Elemento. ....	85
Tabla 17: Elemento, Porcentaje En Peso Y Atómico De Dicho Elemento. ....	87
Tabla 18: Elemento, Porcentaje En Peso Y Atómico De Dicho Elemento. ....	88
Tabla 19: Elemento, Porcentaje En Peso Y Atómico De Dicho Elemento. ....	90

Tabla 20: Materiales Y Los Reactivos Usados Para Cada Práctica Aplicada A La Muestra De Lutita. ....	91
Tabla 21: Resultados Obtenidos En El Laboratorio Para Cada Técnica Analítica. ....	93
Tabla 22: Cálculos Realizados Para Hallar Los Resultados De Cada Técnica Analítica Aplicada A La Muestra. ....	96
Tabla 33: Propiedades De Las Probetas. ....	99
Tabla 34: Materiales Y Su Cantidad En Gramos Para La Elaboración De Las Probetas. ....	100
Tabla 35: Materiales Y Su Cantidad En Gramos Para La Elaboración De Los Cilindros Ym1. ....	100
Tabla 37: Materiales Y Su Cantidad En Gramos Para La Elaboración De Las Probetas Ym3. ....	101
Tabla 38: Materiales Y Su Cantidad En Gramos Para La Elaboración De Las Probetas Ym4. ....	102
Tablas 38: Resultado De Compresión Para Las Probetas Probadas A Los 7 Días, Para Las Muestras Ym1, Ym2, Ym3 Y Ym4. ....	102
Tablas 39: Resultado De Promedio De Compresión Para Las Probetas Probadas A Los 7 Días, Para Las Muestras Ym1, Ym2, Ym3 Y Ym4. ....	103
Tablas 40: Resultado De Compresión Para Las Probetas Probadas A Los 14 Días, Para Las Muestras Ym1, Ym2, Ym3 Y Ym4. ....	104
Tablas 41: Resultado De Promedio De Compresión Para Las Probetas Probadas A Los 14 Días, Para Las Muestras Ym1, Ym2, Ym3 Y Ym4. ....	105
Tablas 42: Resultado De Compresión Para Las Probetas Probadas A Los 28 Días, Para Las Muestras Ym1, Ym2, Ym3 Y Ym4. ....	105
Tablas 43: Resultado De Promedio De Compresión Para Las Probetas Probadas A Los 28 Días, Para Las Muestras Ym1, Ym2, Ym3 Y Ym4. ....	106

## LISTA DE GRAFICOS

Gráfica 1: Ejemplos De Equilibrio .....	46
Gráfico 2: Grafico De Los Minerales Presentes En La Muestra-Drx.....	76
Gráfica 3: Grafico De Los Minerales Presentes En La Muestra-Drx.....	78
Grafica 5. Espectrograma De La Muestra Mostrando Su Composición Química Simple.....	82
Grafica 6. Espectrograma De La Muestra Mostrando Su Composición Química Simple.....	83
Grafica 7. Espectrograma De La Muestra Mostrando Su Composición Química Simple.....	85
Grafica 8. Espectrograma De La Muestra Mostrando Su Composición Química Simple.....	86
Grafica 9. Espectrograma De La Muestra Mostrando Su Composición Química Simple.....	88
Grafica 10. Espectrograma De La Muestra Mostrando Su Composición Química Simple.....	89
Grafico 11: Resistencia A La Compresión Del Material De Agregado Grueso Muestra Ym1 .....	107
Grafico 12: Resistencia A La Compresión Del Material De Agregado Grueso Muestra Ym2 .....	107
Grafico 13: Resistencia A La Compresión Del Material De Agregado Grueso Muestra Ym3 .....	108
Grafico 14: Resistencia A La Compresión Del Material De Agregado Grueso Muestra Ym3 .....	108

## ANEXOS

Anexo A: <i>Picos Representativos del Espectro de Bandas del Análisis en el Espectrómetro de Masas</i> .....	116
--	-----

## RESUMEN

### TITULO

CARACTERIZACION DE RESIDUOS DE MINERIA DEL YESO PARA EVALUAR LA REACTIVIDAD ALCALI-AGREGADO.<sup>1</sup>

### AUTORAS

Pacheco Sarabia Yeny Paola.

Rincón Valero Marcela Paola.

### PALABRAS CLAVES

Agregados, yeso, residuo minero, reactividad, sílice, álcali.

### DESCRIPCIÓN

La caracterización de los residuos de minería permite contar con un referente en la industria de la construcción en cuanto a la forma en que las propiedades internas de estos materiales pueden afectar su comportamiento físico. En este estudio se realizó la caracterización de materiales residuales de una mina de yeso ubicada en La Mesa de Los Santos en Santander evaluando la reactividad álcali-agregado; fue innegable además el enfoque ambiental que tuvo el proyecto en el sentido de la valorización y reciclaje de los residuos para su transformación en materiales con aplicación en la industria de la construcción dando un valor agregado a los subproductos de la industria de la minería y contribuyendo así a la mitigación del impacto ambiental causado por esta actividad. La parte práctica inicial correspondió al análisis composicional de las muestras objeto de estudio para lo que se realizaron secciones delgadas que fueron analizadas bajo el microscopio en donde se identificaron los minerales formadores de roca, se hicieron además análisis de difracción de rayos X y SEM para conocer sus características en términos cualitativos y composicionales. Para evaluar el comportamiento físico del material residual obtenido y su posible uso en la industria de la construcción se llevó a cabo la realización de probetas de concreto para ser sometidas después a ensayos de resistencia. Los resultados mostraron que el material estéril estudiado sería potencialmente reactivo por tanto este no podría tener uso en la industria de la construcción y por ahora seguirá siendo considerado un residuo de la minería.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado. Modalidad proyecto de investigación.

<sup>\*\*</sup> Facultad Fisicoquímica. Escuela de geología. Luis C. Ríos R.

## ABSTRACT

### TITLE

CHARACTERIZACION OF MINING WASTE FROM THE PLASTER TO EVALUATE THE ALKALI-AGGREGATE REACTIVITY.<sup>2</sup>

### AUTHORS

Pacheco Sarabia Yeny Paola.

Rincón Valero Marcela Paola.

### KEYWORDS

Aggregates, gypsum, mining waste, reactivity, silica, alkali.

### DESCRIPTION

The characterization of mining waste can have a reference in the construction industry in terms of how the internal properties of these materials may affect their physical behavior. This study was conducted to characterize waste materials a gypsum mine located in La Mesa de Los Santos in Santander to evaluate the alkali-aggregate reactivity, was also undeniable the environmental approach that had the project in terms of the recovery and recycling of the waste for their reprocessing into materials with applications in the construction industry giving an added value to the products of the mining industry and contributing like that at the mitigation of environmental impact caused by this activity. The initial practice corresponded to a compositional analysis to the samples under study for this were made thin sections and then were analyzed under a microscope to identified the rock-forming minerals, were made analyzes of XRD and SEM for have information about the qualities and compositional characteristics of the samples. To evaluate the physical performance of the waste material obtained and their possible use in the construction industry were made concrete specimens and then were subjected to strength testing. The results showed that sterile material studied could be potentially reactive and cannot be used in the construction industry and for now will still be considered a residue of mining.

---

<sup>2</sup> Degree Project. Research project modality.

\*\* Physic-chemical Faculty, Geology School. Luis C. Ríos R.

## INTRODUCCION

Las propiedades físicas de los agregados se ven innegablemente influenciadas por la composición y la textura de los mismos. Los componentes y el tipo de roca determinan la forma en que intervienen en el comportamiento de estos materiales en el futuro (Tamrakar et al., 2011). Los agregados son usados principalmente en la industria de la construcción como mezcla del asfalto, para el diseño de concreto premezclado entre otras. Estos determinan en gran medida características al ser usado en la industria de resistencia, durabilidad y mantenimiento de las estructuras (Zaidi et al., 2008). La caracterización de los agregados es el primer paso que se hace necesario para facilitar la comprensión de su comportamiento cuando se aplica en cemento, hormigón, asfalto entre otras ha representado un desafío en la industria de la construcción. Los agregados proporcionan estabilidad, resistencia a la intemperie y propiedades físicas a las estructuras de los edificios y las carreteras; su deterioro hace que sus cualidades de durabilidad y calidad se vean afectadas de manera progresiva en las mismas.

La predicción de sus características antes de usarlos puede evitar problemas que se podrían presentar durante la construcción es por eso que la industria debe enfocarse un poco más en los estudios de laboratorio de materiales con el fin de garantizar la calidad para satisfacer los requerimientos determinados.

Dentro de la reactividad álcali-agregado que es un tipo de deterioro que se presenta cuando los constituyentes minerales activos de los agregados reaccionan con los hidróxidos de álcalis que se encuentran en el concreto, tenemos dos tipos: la reacción álcali- carbono (RAC) y la reacción álcali-sílice (RAS) (Tamrakar et al., 2011; Touma et al., 2000). Debido a la ocurrencia de agregados con presencia de alguna variedad de sílice, la reacción álcali-sílice es la más preocupante. Los estudios sobre las reacciones de álcali-sílice en los agregados han mostrado que estas ocurren cuando la disolución alcalina de los

poros del concreto y los minerales silíceos de algunos áridos reaccionan para formar un gel, que aumenta de volumen, es decir, se expande mediante la extracción de agua del medio circundante lo que genera que se produzca la expansión del agregado y su aumento de presión dando lugar a que el cemento en el que se usó empiece a deteriorarse (romperse) (Touma et al., 2000). Es la más frecuente, en ella participan agregados de uso común que contienen sílice amorfa y criptocristalina principalmente, como las rocas vítreas volcánicas y sus tobas, rocas que contienen ópalo y otras rocas con alto contenido de sílice (Touma et al., 2000). La forma que adoptan las expansiones conforme aumenta la proporción de sílice en los agregados, tiende a seguir un modelo en el que las expansiones se manifiestan reducidas y en un nivel no deteriorante, dependiendo del contenido de sílice reactiva (Katayamaa et al., 2004) La velocidad con que esto ocurre depende en gran medida de la proporción del agregado reactivo contenido en el concreto, la alcalinidad del cemento y la disponibilidad del agua.

El presente trabajo se enfocó a la caracterización de residuos de minería con el fin de evaluar la reactividad álcali-agregado, considerando que esta es una aproximación al estudio forense de materiales de construcción como el concreto. De otra parte, es importante considerar el enfoque ambiental de este estudio como quiera que se propone la valorización, el reciclaje y el uso de residuos industriales para su transformación en materiales con aplicación en la industria de la construcción, dando valor agregado a los subproductos de la industria de la minería y contribuyendo en la mitigación del impacto ambiental ocasionado por esta actividad.

# 1. OBJETIVOS

## 1.1 Objetivo General

Caracterización de residuos de minería para estimar la reactividad álcali-agregado en el concreto.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización de los residuos de minería del yeso a partir de estudios petrográficos de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.
- Determinar las fases minerales potencialmente reactivas.
- Llevar a cabo la preparación de probetas de concreto a base de residuos de minería del yeso.
- Realizar ensayos de resistencia de las probetas de concreto a base de residuos de minería del yeso.
- Evaluar el desempeño y durabilidad del concreto a base de residuos de minería del yeso.

## 2. ANTECEDENTES

La reacción álcali agregado es una de las causas del deterioro del concreto más estudiadas en los últimos años.

Por 1920 y 1930 en muchas de las estructuras de concreto se observaron agrietamientos y fracturas inexplicables cuando tenían pocos años de haber sido construidas. Los estudios iniciales fueron hechos por Thomas Stanton un ingeniero americano a finales de 1930 quien vio que en un cilindro de hormigón guardado en un contenedor por un año se presentaba algunas manchas con una fluorescencia blanca a su alrededor que después de ser estudiada resulto ser carbonato de sodio, el cilindro tiempo después se fisuró y generó el interés suficiente para su estudio. Los descubrimientos de Stanton fueron hechos en Monterrey y Los Ángeles, California en los Estados Unidos.

**Figura 1:** *Thomas Stanton apoyado en una pared en la que se observa el efecto de la reacción alcali-silice.*



Fuente: Pasquel, E. Revista Noticreto, 2009.

Ya por 1940 se identificó la reacción álcali-sílice pues se había demostrado que el deterioro que había sufrido el concreto se debía a la reacción entre los álcalis del cemento de Portland y las rocas silíceas de los agregados.

Stanton 1945, la definió como la reacción que se presenta entre determinados agregados activos y los óxidos de sodio y potasio del cemento, la reacción se inicia en la superficie del agregado y se produce en la interface con la pasta de cementos formando un gel que toma agua y se dilata creando presiones internas que llevan a la rotura del material. Para la época Stanton quien era el director de la California State Highway División identifico reacciones entre los álcalis del cemento y ciertas formas de sílice en los agregados que producían expansiones y agrietamiento, denominando oficialmente a este fenómeno Reacción Álcali- sílice o ASR por sus siglas en inglés (Álcali Silica Reactivity) y como tal se le conoce actualmente.

Para 1950 la reacción álcali agregado fue estudiada por muchos laboratorios a nivel mundial, sus inicios se dieron en Los Estados Unidos, luego en Europa y Canadá haciendo que el fenómeno despertara el interés de diferentes científicos a nivel mundial. Gracias a que los estudios tuvieron un rápido avance se lograron identificar los componentes minerales presentes en el agregado que daban lugar a la reacción.

En el año 1957 el Profesor E. G. Swenson del National Reserach Council – Canadá, encontró que en ciertos agregados dolomíticos, el gel expansivo se originaba entre los álcalis y algunos carbonatos reactivos, denominando a este fenómeno Reacción Álcali-Carbonato o ACR por sus siglas en inglés (Alkali Carbonate Reactivity) nombre que persiste hasta la fecha. (Pasquel.; 2009).

Otras grandes contribuciones fueron hechas por el danés Idorn quien fue uno de los primeros científicos europeos en investigar el deterioro del concreto debido a la

reacción álcali- sílice y el australiano Vivian quien contribuyo enormemente al entendimiento de los mecanismos de la reacción que se presentaba por los agregados.

De los dos fenómenos el más conocido es el de la reacción álcali sílice pues la variedad de minerales que pueden llegar a generarlo es más amplia que la de la reacción álcali- carbonato, además el que la reacción álcali- carbonato se presente es menos común porque los componentes que podrían generarla son menos usados en la industria de la construcción pues sus cualidades resistivas y de dureza no son las adecuadas.

Desde el descubrimiento inicial hecho en California se han reportado casos de ASR en todo el mundo. Esta reacción afecta varios tipos de estructuras de hormigón, incluyendo las presas, puentes, aceras y otras estructuras. En 1958, la Junta de Investigación de Carreteras informó del problema generalizado en el Informe Especial 31.

Por la década de 1960, se habían registrado varios casos de ASR en varios países europeos, y la primera Conferencia Internacional sobre la reacción álcali- agregado (ICARR) se llevó a cabo en Copenhague, Dinamarca, en 1974.

### 3. MARCO TEORICO

Con la práctica de la minería se obtienen de manera selectiva minerales y materiales de la corteza terrestre que pueden llegar a ser de interés para el ser humano por el tipo de beneficio que le genera. Al recurrir a esta no solo se obtiene el mineral de interés, también se obtiene otro tipo de material que se considera residual por no tener ningún valor representativo. Este material residual por su cantidad e inutilidad ha sido un problema ambiental para la práctica de la minería en el mundo a través de los años.

El material residual hasta el momento no ha tenido cabida en el mercado por su poca rentabilidad. Las propiedades físicas de los mismos derivadas obviamente de sus propiedades internas lo han relegado a ocupar ese lugar en la industria.

Existen tres tipos de rocas en la superficie terrestre de la que se pueden obtener los materiales de interés para la minería, estas son las rocas ígneas, las rocas sedimentarias y las rocas metamórficas, nuestro estudio se concentra en rocas pertenecientes al segundo grupo.

- **Rocas Sedimentarias**

Las rocas sedimentarias se forman en la superficie de la tierra por procesos de erosión y alteración de rocas preexistentes, lo que supone su disgregación, la formación de detritus y la disolución de componentes en soluciones acuosas, el transporte de los mismos, el depósito de fragmentos de rocas, de organismos o material de precipitación química en zonas apropiadas (cauces de ríos, lagos, mares, etc.) y transformaciones originadas en el ambiente sedimentario o una vez enterradas por debajo de la superficie atmosférica o acuosa (transformaciones diagenéticas). Por esta razón, suelen presentar una disposición en capas denominada estratificación.

Los agregados producidos con sedimentos estratificados pueden variar ampliamente en sus propiedades, como son su forma, textura, porosidad, resistencia y pureza, debido a las condiciones bajo las cuales fueron consolidadas. Las rocas tienden a ser porosas y débiles cuando se forman bajo presiones relativamente bajas. Son densas y resistentes si se forman bajo alta presión. Dichas rocas pueden variar de suaves a duras, de porosas a densas y de ligeras a pesadas. El grado de consolidación, el tipo de cementación, el espesor de las capas y la contaminación, son factores decisivos para determinar la conveniencia como agregados para concreto (Shetty, 2005).

Algunas rocas calizas y areniscas pueden tener menos de 100 MPa de resistencia a la trituración, siendo inadecuadas para su uso en concreto de alta resistencia. Si se compara con las rocas ígneas, las rocas sedimentarias contienen impurezas que en ocasiones no permite su uso como agregado (Instituto Colombiano del Concreto 1997).

A continuación se presenta la descripción de los tipos de rocas sedimentarias más comunes, los principales minerales y características de las mismas como agregados pétreos ver tabla 1.

**Tabla 1.** Composición de las rocas sedimentarias y características como agregados pétreos.

TIPO DE ROCA	NOMBRE COMUN	PRINCIPALES MINERALES PRESENTES	CARACTERISTICAS DEL AGREGADO
Clástica	Conglomerado	Fragmentos de roca y matriz	Puede contener cementante sílico que es reactivo con los álcalis del cemento.
	Arenisca	Cuarzo, feldespato, plagioclasa	Puede contener cementante sílico que es reactivo con los álcalis del cemento.
	Lutita	Minerales arcillosos	Puede presentar fisibilidad, baja resistencia a la compresión, puede hidratarse a través de los minerales arcillosos
No Clástica	Caliza	Calcita	Altamente soluble
	Marga	Calcita y minerales arcillosos	Minerales arcillosos pueden hidratar fácilmente
	Dolomita	Calcita y dolomita	Sus componentes mineralógicos pueden provocar la reacción álcali-carbonato
	Yeso	Yeso anhidrita	Muy ligero, baja la resistencia a la abrasión.
	Carbón	Carbón	Ligero, deleznable y/o frágil, produce problemas durante la hidratación del cemento portland

Fuente: Chan et al. 2003

## 3.1 La Minería Del Yeso

### 3.1.1 El Yeso

El yeso se originó hace 200 millones de años como resultado de depósitos marinos cuando parte de lo que ahora son nuestros continentes eran inmensas extensiones oceánicas. Durante este período algunos mares se secaron dejando lechos de yeso que se recubrieron para ser descubiertos posteriormente por el hombre. Esta roca sedimentaria se ha formado por evaporación marina durante muchos millones de años. La fase de evaporación en sí duró miles de años y llevó a la formación de gruesas capas de depósitos de yeso.

Posteriormente, estas capas de yeso quedaron enterradas por hundimiento natural en un largo período de tiempo, preservándose en las profundidades de la tierra durante millones de años.

En el transcurso del último período glacial, los depósitos de yeso se fueron acercando cada vez más a la superficie de la tierra por el efecto erosivo de los glaciares y los profundos cortes de valles fluviales que dejó el agua de los glaciares.

Es un mineral compuesto por sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que cristaliza en el sistema monoclinico, las capas paralelas del grupo  $(\text{SO}_4)^{2-}$  están fuertemente enlazadas a  $\text{Ca}^{2+}$  las cuales están separadas por moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ . Estos enlaces son débiles lo cual se ve reflejado en la perfecta exfoliación de las capas de yeso. Cuando el mineral sufre una pérdida de las moléculas  $\text{H}_2\text{O}$ , producto de las altas temperaturas de calcinación al que es sometido, cambia la estructura del mineral y su configuración a la de anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y como resultado sufre una disminución del volumen atómico y pérdida de exfoliación perfecta (Galvis, 1987). El yeso puro es un mineral blanco (aljez), pero debido a impurezas puede tornarse gris, castaño o rosado. Se denomina sulfato de calcio dihidratado y su estructura cristalina está constituida por dos moléculas de agua y por una de sulfato de calcio.

**Figura 2:** *Imagen del Yeso.*

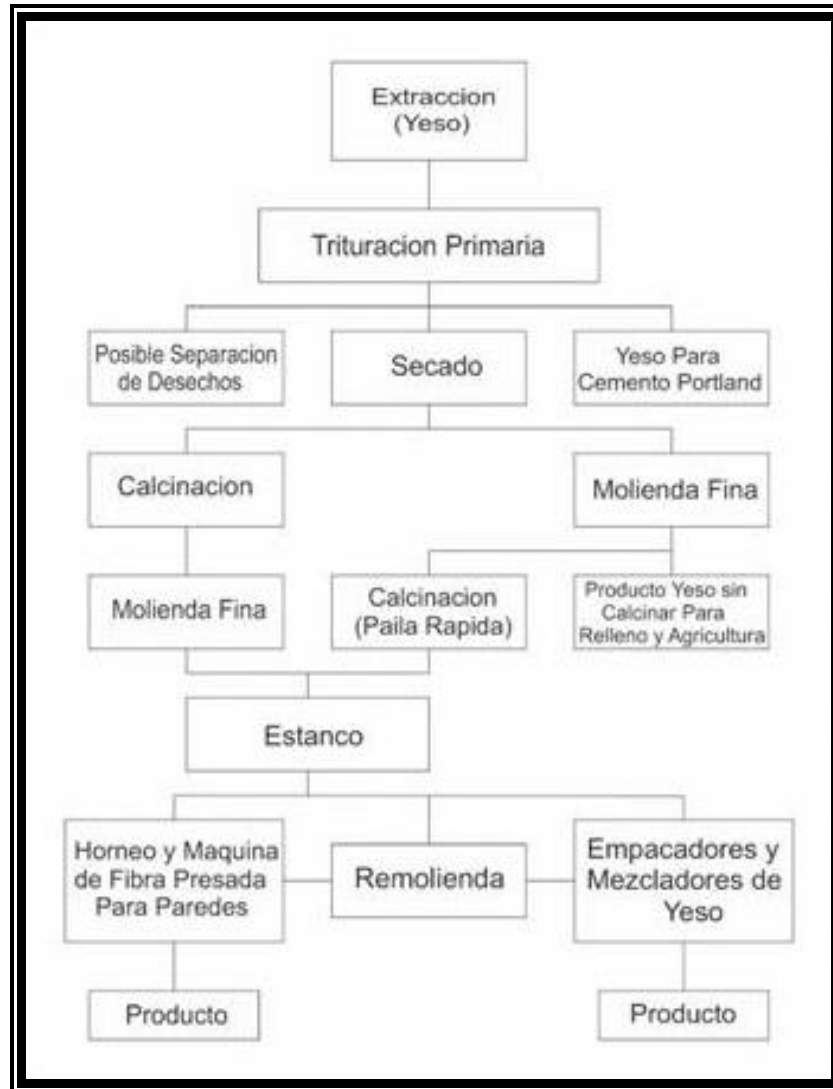


Fuente: *Naranjo, C. et. Al; Rocas y fósiles; 2009.*

- **Proceso de Obtención**

El yeso se obtiene directamente de la naturaleza por extracción en forma de roca de yeso (mineral de sulfato de calcio di hidratado) en canteras o minas y se procesa industrialmente con poca alteración. Este proceso consiste en la calcinación térmica del mineral triturado, eliminando total o parcialmente el agua de cristalización químicamente combinada. Al mezclarse con agua forma una pasta que fragua y endurece, reconstituyendo su estado original.

Figura 3. *Proceso de extracción del Yeso.*



Fuente: *Modificado de: Ramos, j.; Agregados del Yeso, 2008.*

### 3.1.1.2 APLICACIONES

El yeso tiene muchas aplicaciones en diferentes industrias, dentro de las principales tenemos:

- En construcción debido a sus excelentes propiedades bioclimáticas, de aislamiento y regulación higrométrica, mecánicas y estéticas se utiliza en guarnecidos, enlucidos, prefabricados y relieves arquitectónicos, proporcionando bienestar y comodidad. Además el yeso cumple un papel esencial como agente retardante en la producción de cemento.
- En la industria en la cerámica para la elaboración de moldes, aparatos sanitarios, tiza y esculturas artísticas.
- La agricultura para mejorar las tierras de cultivo, como abono y desalinizador.
- La medicina se utiliza en traumatología para elaborar vendas de yeso, en la fabricación de moldes quirúrgicos y odontológicos y en la producción de pasta dentífrica.
- La industria química y farmacéutica como fuente de calcio, componente en medicamentos y lápices labiales, entre otras.

**Figura 4:** Aplicaciones del yeso: A) Aplicaciones en la medicina, B) Aplicación en la decoración, C) Aplicación en la construcción, D) Aplicación en la cerámica.



Fuente: *Los autores*

### 3.1.2 Residuos de la Minería

La minería de rocas y minerales industriales genera residuos que en el mejor de los casos pueden ser usados para su restauración. Este tipo de residuos no constituye materiales peligrosos en su mayoría, la problemática se encuentra en la necesidad de realizar una gestión integrada entre su extracción y su uso. Para obtener la materia prima de interés se hace necesario extraer una cantidad considerable de materiales estériles.

Los residuos de las industrias extractivas se definen como aquellos residuos resultantes de la prospección, la extracción, el tratamiento y el almacenamiento de recursos minerales así como de la explotación de canteras.

Los residuos mineros cuantitativamente más importantes son los inertes que se almacenan en escombreras o en forma de lodos, en balsas o presas. Estos normalmente son empleados para el relleno de los huecos producidos en la extracción del mineral.

Cada empresa debe caracterizar los diferentes tipos de residuos mineros que produce de forma que pueda asignarlos a cualquiera de los siguientes:

- *Residuos mineros*: aquellos residuos sólidos o aquellos lodos que quedan tras la investigación u aprovechamiento de un recurso geológico tales como son los estériles de la mina, gangas, rechazo y colas de proceso e incluso la tierra vegetal y cobertera en determinadas condiciones siempre que se constituyan en residuos.
- *Residuos mineros peligrosos*: Son aquellos que contienen elementos o sustancias que pueden representar un peligro para el medio ambiente, la salud humana o los recursos naturales
- *Residuo minero inerte*: Es aquel que no experimenta ninguna transformación física química o biológica significativa.

Para nuestro caso los residuos mineros hacen parte del primer grupo (residuos mineros).

### **3.1.1.1 Residuos De La Minería Del Yeso**

Los procesos mineros como se ha explicado antes implican el que además de extraer el mineral de interés se generen cantidades importantes de residuos. Cuando se ha decidido explotar un yacimiento yesifero las rocas que se encuentran en contacto con esta pasan a ser consideradas como material estéril. Existen varios tipos de material estéril, uno de los más comunes son las Lutita, que constituyen nuestro material objetivo de estudio.

**Figura 5.** *Residuos de la minería del yeso. En la Mina “El Diviso” en La Mesa de los Santos.*



Fuente: *Los autores.*

### **3.1.1.1.1 Las Lutitas**

La Lutita es una roca sedimentaria compuesta por partículas del tamaño de la arcilla y del limo. Estas rocas detríticas de grano fino constituyen más de la mitad de todas las rocas sedimentarias. Las partículas de estas rocas son tan pequeñas que no pueden identificarse con facilidad sin grandes aumentos y por esta razón, resulta más difícil estudiar y analizar las lutitas que la mayoría de las otras rocas sedimentarias.

Se denominan limolitas y argilitas según si la medida de las partículas es, respectivamente, superior o inferior a 1/256 mm; cuando no son coherentes

reciben los nombres de limos y arcillas. Las lutitas que contienen alrededor del 50% de carbonato de calcio (del 35% al 65%) se denominan margas y suelen ser de colores azulados.

Las diminutas partículas de la lutita indican que se produjo un depósito como consecuencia de la sedimentación gradual de corrientes no turbulentas relativamente tranquilas. Entre esos ambientes se cuentan los lagos, las llanuras de inundación de ríos, lagunas y zonas de las cuencas oceánicas profundas. Incluso en esos ambientes "tranquilos" suele haber suficiente turbulencia como para mantener suspendidas casi indefinidamente las partículas de tamaño arcilloso.

Las lutitas difieren de areniscas y conglomerados en particular en su granulometría más fina. Debido a su tamaño de las partículas finas, el tamaño de grano de lutitas no se puede determinar por los métodos de cribado. El tamaño de partículas de las lutitas que pueden ser desglosados. También, algunas lutitas están firmemente cimentadas que no pueden ser desglosados en partículas individuales, lo que hace imposible determinar el tamaño exacto.

La Fisilidad se define como la propiedad que poseen algunas rocas de dividirse fácilmente en capas finas a lo largo de poco espaciados, más o menos planas, y aproximadamente paralelas a las superficies (Bates y Jackson, 1980)

**Figura 7:** *Lutitas.*



*Fuente: Anonimo; Sedimentary Rocks: Picture Gallery of the Most Common Rock Types; Febrero del 2013.*

Conforme se acumula el limo y la arcilla, tienden a formar capas delgadas, a las que se suele hacer referencia como Láminas. Inicialmente las partículas de las láminas se orientan al azar. Esta disposición desordenada deja un elevado porcentaje de espacio vacío (denominado espacio de poros), que se llena con agua. Sin embargo, esta situación cambia normalmente con el tiempo conforme nuevas capas de sedimento se apilan y compactan el sedimento situado debajo.

Durante esta fase las partículas de arcilla y limo adoptan una alineación más paralela y se amontonan. Esta reordenación de los granos reduce el tamaño de los espacios de poros, expulsando gran parte del agua. Una vez que los granos han sido compactados mediante presión, los diminutos espacios que quedan entre

las partículas no permiten la circulación fácil de las soluciones que contienen el material cementante. Por consiguiente, las lutitas suelen describirse como débiles, porque están poco cementadas y, por consiguiente, no bien litificadas.

Aunque las capas de lutita no pueden formar acantilados escarpados y afloramientos destacables, algunos depósitos tienen valor económico. Algunas lutitas se extraen para obtener materia prima para la cerámica, la fabricación de ladrillos, azulejos y porcelana china. Además, mezclados con la caliza, se utilizan para fabricar el cemento portland. En el futuro, un tipo de lutita, denominada lutita bituminosa, puede convertirse en un recurso energético valioso.

**Tabla 2.** *Propiedades composicionales y texturales de las Lutita.*

<b>Propiedades Composicionales</b>	<b>Propiedades Texturales</b>	
	Según su forma de fragmentación, las Lutita pueden ser físilas o no físilas.	
<p>Las Lutita están compuestas principalmente por filosilicatos como illita, caolinita, clorita, montmorillonita, sepiolita, etc. y ciertas cantidades de óxidos e hidróxidos de hierro (Hematita), cuarzo, y calcedonia</p> <p>A veces, la composición química de la roca proporciona información adicional. Un ejemplo es la lutita negra.</p>	<p>La Lutita físil es aquella que se escinde en planos paralelos espacialmente próximos.</p>	<p>La Lutita no físil, en cambio, se escinde en fragmentos o bloques.</p>

*Fuente: Los autores.*

## **3.2 EL ALCALI Y LOS AGREGADOS**

Se considera álcali a aquellos óxidos, hidróxidos y carbonatos de los metales alcalinos, estos actúan como bases fuertes por ser muy solubles en agua.

Por otra parte los agregados hacen referencia a cualquier combinación de arena, grava o roca triturada en su estado natural o procesado. Estos son minerales comunes, resultado de las fuerzas geológicas erosivas del agua y del viento. Por lo general se encuentran en ríos y valles, donde han sido depositados por las corrientes de agua. Los depósitos de grava están constituidos por materiales que han sido separados más o menos de otros. La diferencia básica entre las arenas y las gravas, de acuerdo a una clasificación geológica comúnmente aceptada, es el tamaño de grano. Generalmente las fracciones entre 1/16 y 5 mm se denominan arenas y el material mayor de 5mm se llama grava. (Asogravas, 2011)

Los agregados se clasifican en 4 grandes grupos: Depósitos aluviales, materiales de arrastre, las calizas, los ígneos y los metamórficos.

Son usados principalmente en la fabricación de mezclas de concreto, asfalto, mortero, como bases y sub-bases en la construcción de vías, drenajes o balasto para vías de ferrocarril. Estos son imprescindibles para la sociedad, son materiales por lo general de bajo costo que se encuentran abundantes en la naturaleza por lo que deben estar situados cerca a los centros de consumo por su coste en términos de transporte.

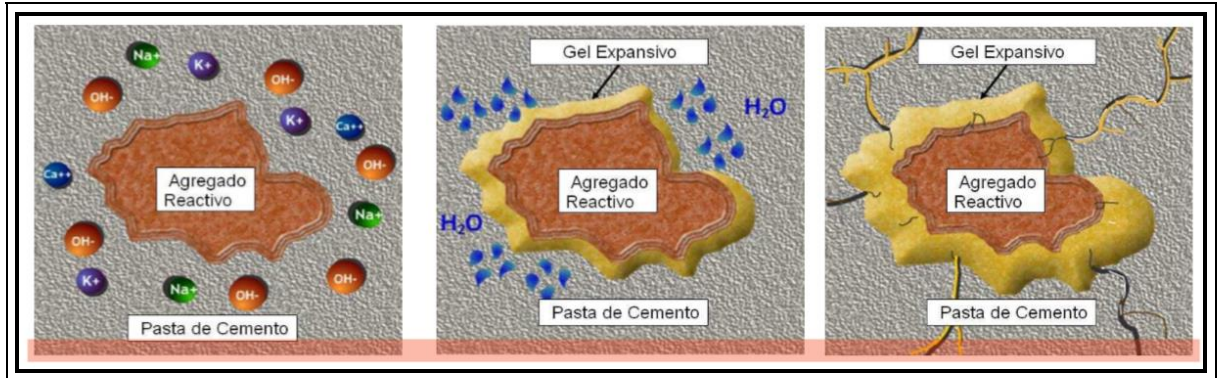
### **3.2.1 LA REACTIVIDAD ÁLCALI – AGREGADO**

La reactividad álcali-agregado es un tipo de deterioro que ocurre cuando los constituyentes minerales activos de algunos agregados reaccionan con los hidróxidos de álcalis en el concreto. La reactividad es potencialmente peligrosa sólo cuando produce expansión considerable. Ocurre de dos formas: reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC). La reacción álcali-sílice es

más preocupante que la reacción álcali-carbonato pues es más común la ocurrencia de agregados conteniendo minerales de sílice.

En la figura 6 se puede observar las fases de desarrollo de la reacción álcali-agregado:

**Figura 6:** Fases de desarrollo de la reacción álcali agregado.



Fase 1: Agregado reactivo dentro de la pasta de cemento con 'alcalis (Na y K) y radicales OH

Fase 2: La presencia de humedad activa la reacción alcali-agregado

Fase 3: Hinchamiento y fisuración

*Fuente: Pasquel 2009.*

Se requieren 4 condiciones que deben darse simultáneamente para que exista la reacción:

- 1) Agregado sensiblemente reactivo con los álcalis
- 2) Suficiente cantidad de álcalis para activar la reacción
- 3) Humedad necesaria para que los álcalis entren en solución y generen la reacción química
- 4) Mantenimiento de la reacción química el tiempo requerido para originar el gel y que se expanda provocando fisuración.

Si alguna de estas condiciones está ausente, es entonces imposible que se produzca la reacción. (Bauer, S; et. Al; 2011)

Lo que puede indicarnos que exista presencia de la reactividad son redes de agrietamiento, juntas cerradas o lascadas, dislocación en diferentes partes de la estructura. Como el deterioro por la reactividad suele ser un proceso lento, el riesgo catastrófico es bajo.

**Figura 7:** *Fisuración, cerramiento de juntas y dislocación lateral causadas por la severidad de la reacción álcali- agregado en un muro de parapeto.*



*Fuente: Bauer, S; et. Al; 2011)*

La reacción álcali-agregado se caracteriza por la presencia de dos zonas alrededor de la mayoría de los agregados fracturados y a lo largo del plano de rotura: Una de ellas externa y oscura, en contacto con los agregados es un gel rico en  $\text{SiO}_2$  conteniendo además Ca y K. La otra interna y blanca, está formada por cristales en forma de hojas más o menos dispersas, conteniendo Si, K y Ca.

El agrietamiento, tiene la forma de un "mapa". En concreto armado, las fisuras pueden ser paralelas al refuerzo. A través de las grietas se efectúa la exudación

del gel con carácter viscoso, que- en contacto con CO<sub>2</sub> de la atmósfera endurece con una coloración blanca.

Pese al tiempo transcurrido, desde los estudios iniciales de Stanton en 1940, la reacción álcali-agregado que ha sido descrita en una abundante bibliografía, es insuficientemente conocida, y no se ha llegado a ninguna conclusión sobre los mecanismos de la reacción, de la expansión y la deterioración que origina. Parece ser que conforme se tiene un mayor y más profundo conocimiento del fenómeno, la solución aparece más compleja y difícil, por la diversidad de parámetros que la afecta.

Dentro del limitado conocimiento existente la solución del problema de la reacción álcali-agregado resulta aparentemente obvia, adoptando la alternativa de utilizar agregados reactivos con un cemento portland de reducido porcentaje de álcalis.

En la tabla 3. Se muestran según el tipo de reacción las rocas y minerales que pueden ser potencialmente reactivos con los álcalis del cemento.

**Tabla 3:** *Minerales, Rocas y Materiales Sintéticos que pueden ser Potencialmente Reactivos con los Álcalis del cemento.*

REACCIÓN ÁLCALI - SÍLICE	REACCIÓN ÁLCALI - CARBONATO
<p>Andesitas, Argillitas, Calcedonia, Ciertas Calizas, Ciertas Dolomitas, Cristobalita, Cuarzita, Cuarzosa, Dacitas, Esquistos, Filita, Gneis Granítico, Ópalo, Pizarras Opalinas, Pizarras Síliceas, Riolitas, Tridimita, Vidrio Síliceo, Vidrio Sintético</p>	<p>Calizas Dolomíticas, Dolomitas Calcíticas, Dolomitas de Grano Fino.</p>

*Fuente: Pasquel 2009.*

Como ya se mencionó existen dos tipos de reacción álcali- agregado conocidas, estas son las reacciones álcali-carbonato y la álcali-sílice, esta última por ser la más común y por ser la que probablemente se presentaría en el material objetivo de estudio será en la que nos enfocaremos y que llamaremos (ARS) por sus siglas en ingles.

- **La reacción álcali- carbonato**

Este tipo de reacción se produce por los álcalis del cemento que actúan sobre ciertos agregados calcáreos, como por ejemplo los calcáreos de grano fino que contienen arcillas, que son reactivos y expansivos. Este fenómeno se presenta preferentemente cuando el material está sometido a la humedad. Se ha planteado que el fenómeno se debe a la transformación de la dolomita en calcita y brucita, que es fuertemente expansiva y adopta la forma de un gel que origina presión interna debido al crecimiento de los cristales.

- **La reacción álcali – sílice**

Los agregados en el concreto existen en una matriz de pasta de cemento, esta pasta tiene poros microscópicos interconectados a través de las que el agua o iones en solución pueden migrar fácilmente (Bauer, S; et. Al; 2011).

El Sodio y el Potasio pueden reaccionar en presencia de iones OH sea con la sílice amorfa (ópalo, calcedonia), o sea con los silicatos (granitos, esquistos, feldespatos, micas, basaltos), sea con los calcáreos arcillosos dolomíticos.

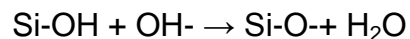
La reacción de la sílice con los álcalis da nacimiento a sales expansivas,  $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O-CaO-H}_2\text{O}$  que llevan a la fisuración del concreto.

La reacción álcali-sílice (ASR) es la más común y estudiada de las reacciones álcali-agregado. En la fabricación del hormigón, la hidratación del Pórtland da como resultado una solución intersticial que contiene hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución. La reacción

álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los poros del hormigón y los minerales silíceos de algunos agregados reaccionan para formar un gel, que al embeber agua, aumenta de volumen. Anteriormente se creía que el mecanismo de la reacción era distinto para las rocas con minerales silíceos cristalizados que para las rocas con estructura más desordenada, distinguiéndose entre reacción álcali – silicato (ASSR) y reacción álcali –sílice (ASR) respectivamente. Sin embargo, se ha demostrado que no es así y que la reacción es la misma, sólo que en función del grado de cristalización de la sílice, la cinética de la reacción varía, dándose más rápidamente cuanto menor es este grado. La expansión viene causada por la presión osmótica. Los geles de silicato alcalino pueden ejercer grandes presiones de imbibición durante el proceso expansivo, mayores que la resistencia a tracción del hormigón. Según el Boletín 79 del ICOLD (1991), las reacciones que se producen son principalmente dos, y lo hacen simultáneamente:

- Reacción 1: Reacción ácido-base, neutralización de los grupos silanol (Si-OH) por la solución alcalina con sosa cáustica  $\text{NaOH} = \text{Na}^+ \text{OH}^-$  :

En primer lugar el grupo silanol reacciona con el  $\text{OH}^-$ , y da como producto  $\text{Si-O}^-$ , que al reaccionar con el  $\text{Na}^+$ , produce un gel de silicato.



- Reacción 2: Ataque de los puentes de siloxeno por la solución alcalina, lo que provoca una desintegración de la estructura y el paso de la sílice en solución al estado de iones positivos ( $\text{H}_2\text{SiO}_4$ )



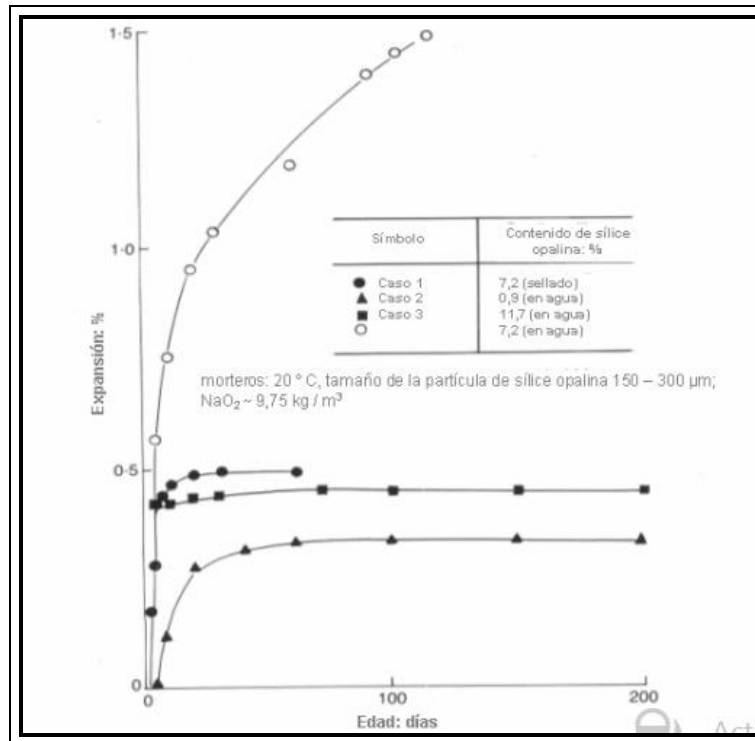
Mirando la formulación de estas reacciones, podemos apreciar la importancia que tienen los iones  $\text{OH}^-$  en las mismas, porque para que se produzcan es primordial la presencia de este ion.

Para que se dé la reacción álcali-sílice, es necesaria la presencia de sílice reactiva, álcalis sodio y potasio, y agua. Pero para que la reacción además produzca fisuración y expansión se requiere que las cantidades tanto de sílice reactiva como de álcalis disponibles, sean significativas y que el agua provenga de una fuente externa.

La reacción cesará pues cuando uno de los reactivos se consume o cuando la concentración de ion hidroxilo es tan baja que la sílice reactiva no es atacada. En la Figura 2.1, Hobbs (1988), para relaciones agua / cemento y árido / cemento de 0,35 y 1,00 respectivamente, se pueden observar ejemplos donde se establece el equilibrio bien porque la reacción se ha completado, bien porque se da el equilibrio físico:

- Caso 1: la expansión cesa cuando ya no hay agua disponible
- Caso 2: la expansión se estabiliza cuando se reduce toda la sílice disponible
- Caso 3: la concentración de metal alcalino o la de ion hidroxilo se reduce a un Nivel umbral.

**Gráfica 1: Ejemplos de equilibrio**



*Fuente: Segarra, J; 2005.*

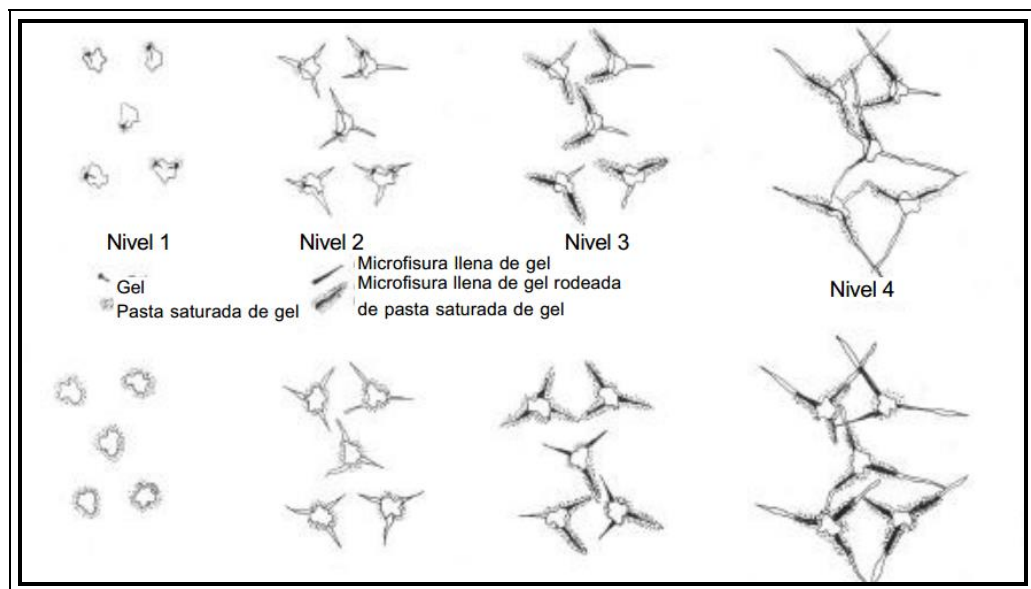
Como la expansión causada por la ASR se debe a las tensiones inducidas por el crecimiento del gel al absorber el fluido intersticial, ésta dependerá del volumen de concentración del gel, de su velocidad de crecimiento y de sus propiedades físicas. Si la velocidad de crecimiento es lenta, las fuerzas internas se disipan por la migración del gel a través del hormigón, mientras que si la velocidad es relativamente rápida, las fuerzas internas pueden llegar a un nivel en el que pueden ocasionar fisuras y la expansión del hormigón.

En la Figura 8 se muestran los diferentes niveles de formación de las fisuras debido a las tensiones internas:

- Nivel 1: el gel crece induciendo tensiones internas, pero no se dan microfisuras.

- Nivel 2: las tensiones inducidas son lo suficientemente grandes para causar microfisuras en la proximidad de las partículas reactivas, sólo ocurre una expansión insignificante
- Nivel 3: el gel migra hacia algunas microfisuras y hay un lento fortalecimiento de las fuerzas internas
- Nivel 4: las fuerzas internas inducidas alrededor del gel que llena las microfisuras son lo suficientemente grandes para causar microfisuras extensivas y se pueden producir grandes expansiones

**Figura 8:** Niveles de formación de las fisuras debido a las tensiones internas.



*Fuente: Segarra, J; 2005.*

En la tabla 4 se detallan las causas y mecanismos del deterioro del hormigón por la reacción álcali sílice.

**Tabla 4:** causas y mecanismos del deterioro del hormigón por la reacción álcali – sílice.

MECANISMO	ASPECTOS	CAUSAS ACTUANTES
<p style="text-align: center;"><b>REACCIONES AGREGADO - CEMENTO</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Expansión física del hormigón</li> <li>- Fisuración al azar en las superficies expuestas</li> <li>- Fisuración interna del mortero, disminuyendo a medida que el deterioro avanza</li> <li>- Deposiciones gelatinosas y viscosas en poros o fracturas del agregado</li> <li>- Coronas de reacción en los agregados</li> </ul>	<p>a) Geles sílico – alcalinos formados en medio acuoso causan la expansión y rotura de los agregados y del mortero.</p> <p>La reacción continúa mientras los álcalis se reciclan o se reponen por el cemento o por aportaciones salinas externas</p> <p>b) Filosilicatos finamente divididos se embeben de agua o reaccionan con los álcalis y expanden de forma disruptiva</p> <p>c) Fases meta estables reaccionan para formar un sólido de gran volumen (por ejemplo letrinita)</p>

*Fuente: LAFARGE, Folleto técnico.*

Estas reacciones se presentan con mayor intensidad en climas cálidos por los siguientes factores: elevada humedad de ambiente; temperatura, en especial de 20° a 40°C; y fisuras previas de contracción plástica.

Cuando no se tiene experiencia previa del comportamiento activo del agregado, no es posible evaluarlo cabalmente por la carencia de un método rápido y seguro. Usualmente se parte por la investigación petrográfica de los agregados para lo cual se cuenta con la norma ASTM C-295.

### **Factores que afectan a la reacción**

- **Alcalinidad**

La expansión y fisuración se dan cuando los áridos descritos anteriormente se usan como árido grueso en hormigones y cementos con alto contenido en álcalis. Los álcalis provendrán principalmente del cemento, aunque también pueden provenir de otros componentes del hormigón y de fuentes externas: adiciones minerales, aditivos, áridos contaminados con sal...etc.

En cuanto al efecto de la variación de la alcalinidad, por un lado hay autores como Gillot y Swenson (1969), y Deng y Tang (1992), que afirman que el aumento de la alcalinidad provoca un aumento en la velocidad de la reacción. Pero por otro, los autores que defienden una reacción en la que no intervienen directamente los iones Según Gonzales (1991) entre los factores que influyen en la reacción álcali-sílice destacan los siguientes:

- **Tamaño del árido**

Cuánto menor es el tamaño del árido reactivo, menor es la expansión observada. Dado que se produce una mayor expansión en el contacto pasta - árido, el porcentaje relativo de volumen de expansión de las partículas de árido menores es mayor que el de las partículas más grandes, pero la expansión absoluta es al contrario, Alaejos y Bermúdez (2003). Rodeadas de una interface porosa y flexible, las partículas más pequeñas contribuyen menos a la expansión del hormigón que los áridos más grandes. Si la porosidad de la interface se reduce, se produce el efecto contrario, Tong y Tang (1999).

La fisuración y expansión se dan únicamente en las calizas dolomíticas arcillosas con la textura requerida y la composición apropiada: cristales romboédricos de dolomita (un tamaño de 50 micras o menor) distribuidos de una forma relativamente dispersa en una matriz de calcita micrítica, en la que hay entre un 5 y un 25 % de residuo insoluble en ácido, compuesto de illita y clorita, con algo de cuarzo sedimentario. El mayor potencial expansivo de los áridos se produce cuando la relación calcita - dolomita es de 1:1.

- **Composición**

Los áridos que se ven afectados por la ASR, son aquellos que en su composición cuentan con minerales silíceos. Los áridos que componen los hormigones vienen de unas rocas que se encuentran en un estado distinto a sus condiciones naturales, por lo que evolucionarán hasta encontrar un nuevo equilibrio. Hay que tener en cuenta que a la hora de producirse la reacción, ésta será más rápida en tanto que más desordenada sea la estructura del mineral: si la forma de sílice está bien cristalizada o es relativamente densa, el ataque será superficial, mientras que si está pobremente cristalizada los iones hidroxilos y sodio o potasio entrarán en el interior.

En cuanto a los minerales se debe tener en cuenta que el cuarzo es la forma más común de sílice y tiene una disposición ordenada del tetraedro de silicio y oxígeno que es estable bajo condiciones normales. Por otro lado, el ópalo es la forma más desordenada y reactiva de sílice, forma una red aleatoria de tetraedros con espacios entre los grupos de moléculas.

- **Propiedades del cemento, álcalis**

Los álcalis sodio y potasio en el cemento tienen su origen en las materias primas usadas para la manufactura del cemento Portland, arcillas, piedras calizas, tizas, y esquistos y si el carbón se usa como combustible, también pueden venir de las cenizas de éste. Los compuestos alcalinos en el clinker son sulfatos alcalinos, álcali – aluminatos y aluminoferritas, y álcali - silicatos.

El contenido de ácido soluble de un cemento Portland se calcula convencionalmente como equivalente en óxido de sodio usando la fórmula siguiente:



Equivalente de óxido de sodio = contenido en óxido de sodio + 0,658 · contenido en óxido de potasio.

- **Humedad ambiental**

Para que se produzca la reacción álcali - sílice se necesita un cierto contenido de agua. Se considera que no se producirá daño, o que su evolución cesará, si la humedad ambiental es inferior al 80 %, suponiendo el aire como la única fuente de humedad.

La humedad puede provenir de dos fuentes: a) Externamente por las condiciones de exposición al medio ambiente, que incluyen humedad relativa elevada, lluvia, flujo de agua si se trata de estructuras hidráulicas, ambiente marino, riego, etc. y b) Internamente cuando las estructuras son de grandes dimensiones y nunca llegan a eliminar totalmente su humedad, caso característico en las represas, hidroeléctricas, puentes, etc. El ingreso de humedad externa lo podemos limitar en algunas estructuras colocando alguna barrera superficial impermeable que contribuya a esto (pinturas, bitúmenes, láminas plásticas, etc.), pero en muchas de ellas esto no es posible, por lo que la mejor recomendación es reducir la porosidad y en consecuencia su permeabilidad limitando la relación agua/cementante a valores no mayores de 0.50 o menos y mejor aún si se emplean adiciones minerales ya que reducen permeabilidad. Esta última medida también funciona con la humedad interna cuando usamos relaciones agua/cementante máximas de 0.40 pues en estos casos no sobra agua de lubricación y el agua interna disponible la consume totalmente el proceso de hidratación (Pasquel 2009).

Hay que tener en cuenta, que determinadas estructuras de hormigón, como las presas, están en contacto permanente con agua. Éstas, tienen por un lado,

contacto permanente con la misma en el paramento aguas arriba y por otro, en su interior, dado que el hormigón tiene un cierto grado de permeabilidad, también habrá cierto grado de humedad.

- **Temperatura**

En general, la velocidad de reacción y la formación de gel aumentan con la temperatura. Pero hay que tener en cuenta que al mismo tiempo, el gel a altas temperaturas es menos viscoso y se introduce mejor por las fisuras y huecos del hormigón, pudiendo disiparse en parte la expansión.

### **3.4 IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LOS RESIDUOS DE MINERIA**

El impacto ambiental generado por los residuos es innegable pues las operaciones mineras conllevan el uso y la transformación de extensiones y volumen del terreno a diferentes escalas. Existen una serie de efectos ambientales durante la etapa operacional y tras el abandono cuya magnitud del impacto va a estar condicionada por las aptitudes locales y el tipo de explotación. Los principales efectos medioambientales de las actividades mineras son los siguientes:

**Tabla 5:** Efectos medioambientales de las actividades mineras.

<b>Principales efectos medioambientales de las actividades mineras</b>	Alteración del paisaje
	Modificación del hábitat ecológico
	Dstrucción de cubierta vegetal
	Ruido
	Emisiones de polvo y sedimentación del mismo
	Modificación de cursos de agua
	Modificación de niveles piezométricos
	Generación de residuos
	Contaminación de suelos
	Contaminación de aguas superficiales y subterráneas

*Fuente:* Los autores.

Se debe tener en cuenta que no siempre se presentan todos y que su trascendencia es variable según sea el caso.

También cabe hacer mención a los problemas de seguridad para los bienes y las personas, especialmente en explotaciones abandonadas. Se deben fundamentalmente a inestabilidad estructural de elementos tales como escombreras, balsas y galerías subterráneas, así como a la existencia de huecos en el terreno sin protección o señalización.

La contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas, viene a menudo determinada por la generación de aguas ácidas que frecuentemente se produce en explotaciones metálicas y en la minería del carbón, que no es nuestro caso. Con los residuos de la minería encontrados en la Mina “El Diviso” podemos observar que los efectos ambientales encontrados fueron principalmente: la alteración del paisaje, la modificación del hábitat ecológico, destrucción de cubierta vegetal, ruido, emisiones de polvo y sedimentación del mismo y por supuesto la generación de residuos.

## **4. METODOLOGIA**

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos es necesaria la ejecución de estudios basados en la aplicación de una metodología orientada, la cual se plantea en las etapas descritas a continuación:

### **4.1 Fase De Recolección Bibliográfica:**

La recolección de información bibliográfica se hizo durante todo el tiempo de desarrollo del proyecto. Durante esta se acudió a la consulta y recolección bibliográfica de publicaciones en diferentes bases de datos dentro de estas la de la red ScienceDirect, publicaciones dentro de las que se encontraron libros, revistas, trabajos de grado de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander y material de circulación libre encontrado en Internet. Esta consulta permitió reforzar mi conocimiento del tema, despejar las dudas que se presentaron con el desarrollo del proyecto y la obtención de información de estudios hechos previamente.

### **4.2 Fase De Recolección Del Material Objetivo De Estudio:**

Durante esta fase se hizo una visita de campo en donde se tuvo acceso a la mina “El Diviso” en La Mesa de Los Santos en Santander, en esta se extrajo el material objetivo de estudio y se tomaron datos para conocer la geología de la zona, durante el trabajo de campo se reconoció y selecciono el material y las muestras representativas que serían la base del estudio. La recolección de muestras de la mina “El Diviso”, se hizo tomando muestras del material estéril de la mina que se obtuvo directamente de los botaderos, también se ingresó a esta y se obtuvieron muestras frescas de las tres litologías presentes: yeso y dos tipos de estériles encontrados que corresponden a lutitas, el material seleccionado y muestreado fue trasladado a las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander para la realización de los estudios.

### **4.3 Fase De Preparación De Las Muestras:**

#### **4.3.1 Probetas experimentales**

Después de realizada la fase de campo, se recolecto el material de interés en la Mina El Diviso ubicada en la Mesa de Los Santos, Santander. Este fue transportado hasta los laboratorios de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Otra cantidad de material (5 bultos) exclusivamente de Lutita compactas fue transportado hasta la planta de CEMEX en la ciudad y de ahí hasta la UIS. Una vez en los laboratorios se procedió a partir los bloques con una porra de 16 libras hasta dejar las muestras a un tamaño ideal para que este pudiera pasar por la trituradora de mandíbulas BB200 RETSCH que se encuentra en el laboratorio de molienda y trituración de la Escuela de Geología.

Del material triturado se obtienen 2 bultos que fueron transportados a los laboratorios de hormigón simple de la Escuela de Ingeniería Civil para la posterior realización de las probetas experimentales.

#### **4.3.2 Pruebas para caracterización química**

Se tomó una muestra por cada tipo de material encontrado en la Mina El Diviso y estos se pasaron por la trituradora de mandíbulas BB200 RETSCH, luego se pulverizaron en la pulverizadora BUEHLER LTD y una parte fue transportada al laboratorio de Materiales de la Escuela de Química y otra a las instalaciones de Guatiguara de la UIS en Piedecuesta, Santander para hacer las respectivas pruebas.

#### **4.3.3 Secciones delgadas**

Se tomaron tres muestras (una por cada tipo de material) y se llevaron hasta el laboratorio de Geología para realización de secciones delgadas, en donde se

cortaron, pulieron y fueron aplicados todos los procedimientos para la elaboración de tres secciones que fueron analizadas luego en el laboratorio petrografía de la Escuela de Geología.

#### **4.4 Fase De Caracterización Mineralógica Y Petrográfica**

Esta fase comprendió el análisis de las secciones delgadas en donde se determinaron los rasgos mineralógicos, texturales, estructurales del material recolectado, definiendo la presencia de fases potencialmente reactivas.

#### **4.5 Fase De Caracterización Química:**

Esta fase comprendió el análisis del residuo de la minería del yeso a partir de técnicas analíticas como análisis de difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido.

#### **4.6 Fase De Preparación De Probetas Experimentales:**

Se hicieron un total de 36 probetas experimentales a las que se les vario la cantidad de agregado grueso con el fin de obtener mejores resultados a la hora de aplicar las pruebas de compresión. Las probetas fueron elaboradas en el laboratorio de suelos de la Escuela de Ingeniería Civil, para su elaboración se mezclaron cantidades determinadas de agregado fino, cemento, arena, agua y agregado grueso (Lutita), estas se realizaron según especificaciones de la NTC 176 (Norma técnica para agregados en Colombia), después de armadas las probetas estas se dejaron 24 horas para el proceso de fraguado y luego se llevaron hasta una pileta de agua para el proceso de curado.

#### **4.7 Fase De Realización De Pruebas Físicas, Mecánicas Y Químicas Del Concreto A Bases De Residuos De La Minería Del Yeso:**

Estas pruebas están enfocadas a evaluar el desempeño y durabilidad del material obtenido, se usaron técnicas gravimétricas para determinar características del material objetivo.

#### **4.8 Fase De Integración De La Información E Interpretación De Los Resultados:**

Durante esta fase se procedió a analizar los resultados de las pruebas realizadas.

#### **4.9 Fase De Elaboración Del Informe Final:**

Esta fase comprende la elaboración del informe final en donde quedaran plasmados los resultados del trabajo realizado durante el desarrollo del proyecto.

## 5. RESULTADOS

Las muestras recolectadas en la mina “El Diviso”, fueron sometidas a diversas pruebas que comprendieron: un análisis petrográfico de tres secciones delgadas (una para cada tipo de roca), pruebas de caracterización química (pruebas de rayos X y SEM), pruebas a la resistencia y durabilidad del material en probetas experimentales fabricadas previamente.

En la tabla 6 aparece la forma como se renombro cada muestra para hacer más fácil el manejo en el lenguaje de las pruebas y los datos recolectados.

**Tabla 6:** *Nomenclatura asignada a las muestras recolectadas en la mina “El Diviso”.*

MUESTRA	NOMENCLATURA
Lutita	Yp1
Lutita fisil	Yp2
Yeso	Yp3

*Fuente: Los autores.*

### 5.1 Contextualización De La Mina El Diviso

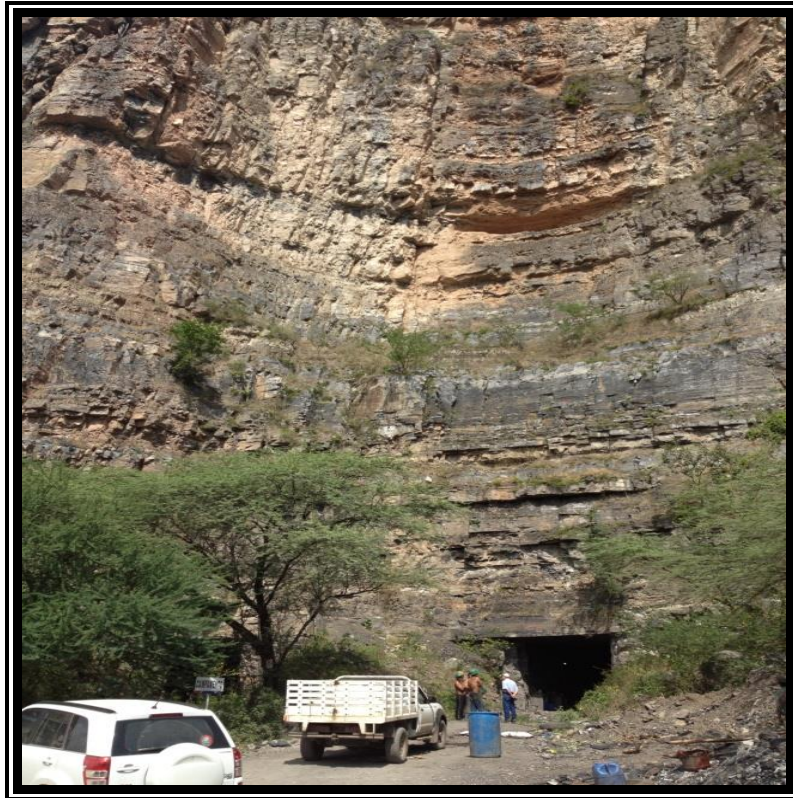
Se presenta a continuación la información geográfica y geológica de la zona donde se extrajeron las muestras de roca para su análisis en este proyecto con el fin de lograr todo el aprovechamiento industrial de los residuos de minería del yeso.

### 5.1.1 Localización Geográfica

La Mina El Diviso se encuentra en el corregimiento del mismo nombre perteneciente al Municipio de Los Santos, las coordenadas geográficas de la mina son  $X= 6'764.055$   $Y= -73'184.600$ , la mina se encuentra a una altura de 619 metros sobre el nivel del mar. El error de los datos tomados en la zona es de +/- 12 metros. Al frente de la mina encontramos el Río Chica mocha que se intersecta en ese punto con el Río Suarez para formar el Rio Sogamoso.

El acceso a la mina es complicado por la falta de vías adecuadas. Se llega a la población de la Mesa de Los Santos y luego se accede a la zona por la carretera destapada que comunica La población de Los Santos con el corregimiento conocido como El Diviso.

**Figura 9:** *Entrada a la Mina El diviso.*



*Fuente: Los autores.*

## 5.2 Generalidades:

- **Modo de Explotación**

La explotación se hace de manera subterránea, para el acceso al material objetivo (el yeso) fue construido un túnel principal a partir del cual siguieron avanzando hasta encontrar el yeso 105 metros dentro, desde ahí han hecho 5 túneles internos. Para obtener el material de interés se usan explosivos (anfo) el material es transportado a las afueras de la mina en volquetas hasta el centro de acopio.

- **Tipos de material encontrados en la mina**

En el sector donde se encuentra la mina se pueden identificar 2 tipos de roca principalmente yeso y material estéril constituido por Lutita que encontramos de dos formas: fisiles y unas más compactas, cerca al área encontramos también calizas pero este material no se considera rentable porque está muy sectorizado y en poca cantidad.

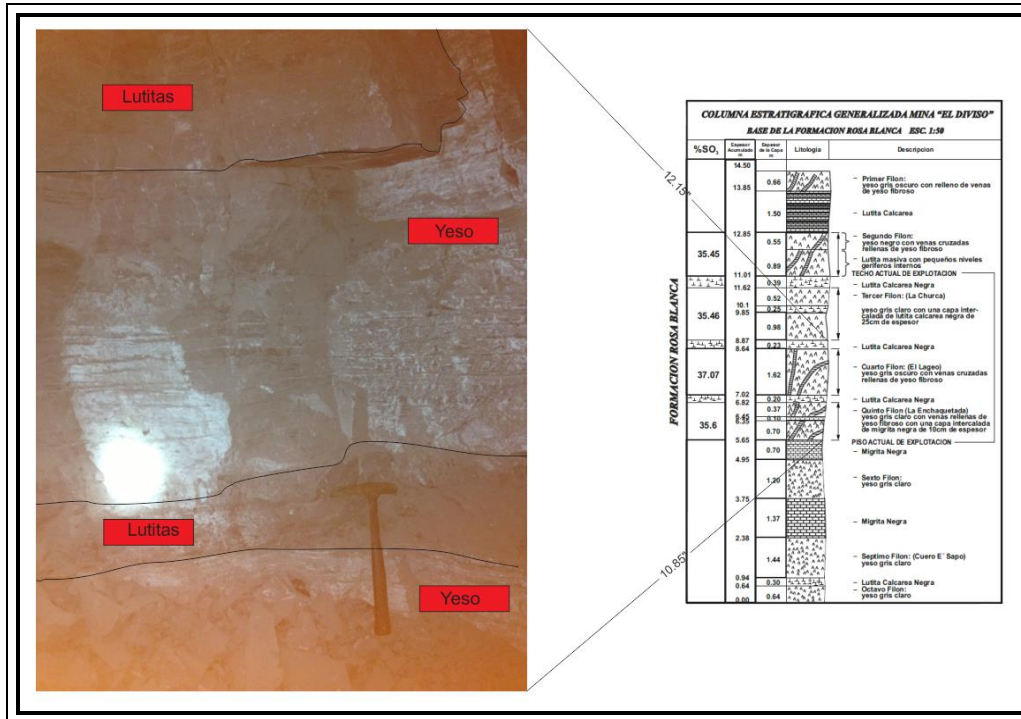
El material de interés se lleva segregado. En la mina se hace la separación del Yeso y del material estéril.

La capa de interés del yeso (la capa que explotan) tiene un espesor de 1,60 metros en algunos sectores.

El material es transportado a las afueras de la mina lo que sería considerado como un primer botadero y la mayor parte se transporta hasta el centro de acopio.

En la figura 10 se puede observar un afloramiento de las rocas presentes en la mina “El Diviso”.

**Figura 10:** Afloramiento de los tipos de materiales encontrados en la mina, la fotografía fue tomada de un afloramiento de roca fresca (dentro de la mina), la oscuridad en la imagen se debe a la falta de luz dentro de la mina. Se hace una correlación con la columna estratigráfica de la mina con el afloramiento del que se obtuvo el registro fotográfico.



Fuente: Los autores.

- **Botaderos:**

Uno de los botaderos se encuentra a las afueras de la mina el otro lugar en donde ubican el material estéril se encuentra en el centro de acopio que se encuentra cerca.

**Figura 11:** *Botadero del material estéril ubicado a las afueras de la mina.*

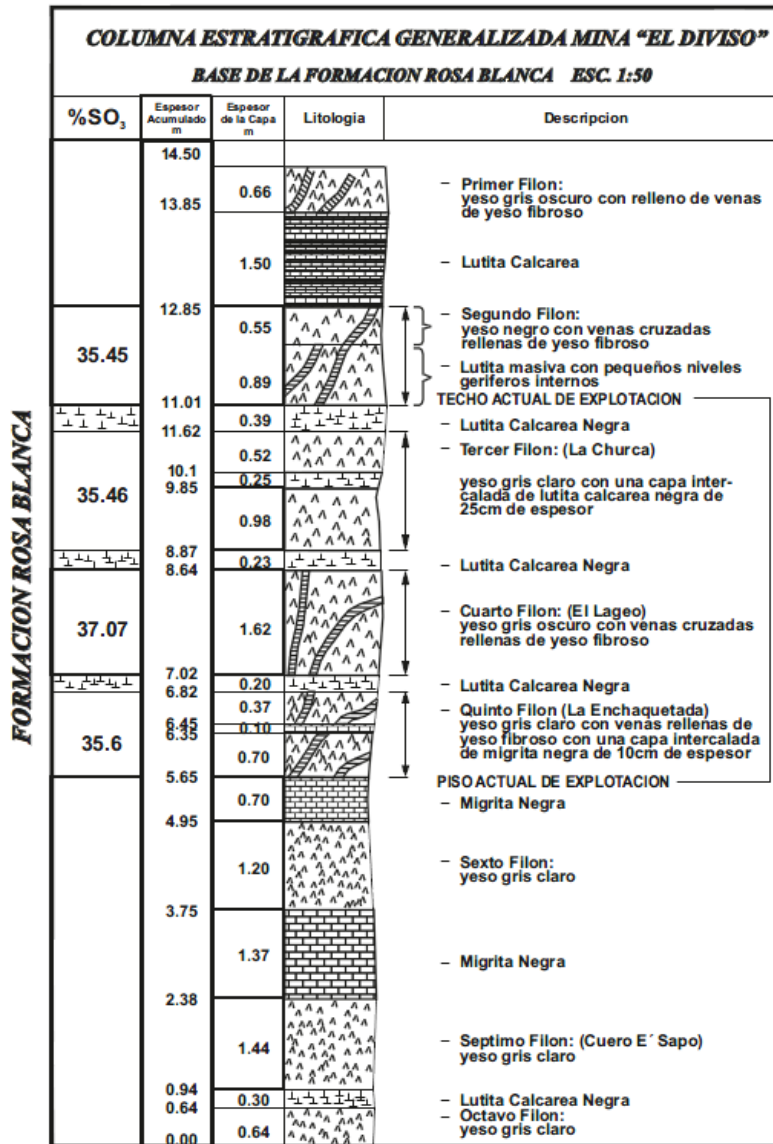


*Fuente: Los autores.*

- **Columna Estratigráfica Generalizada**

A continuación se muestra la columna estratigráfica generalizada de la mina “El Diviso”.

**Figura 12:** Columna estratigráfica generalizada, mina: El Diviso, Los Santos, Santander.



Fuente: Los autores en colaboracion con CEMEX.

### 5.3 Análisis Petrográfico

Se realizó el análisis petrográfico de las muestras Yp1, Yp2 y Yp3, que corresponden a Lutita, Lutita fisil y yeso respectivamente, las secciones delgadas se elaboraron en el laboratorio de la escuela de geología.

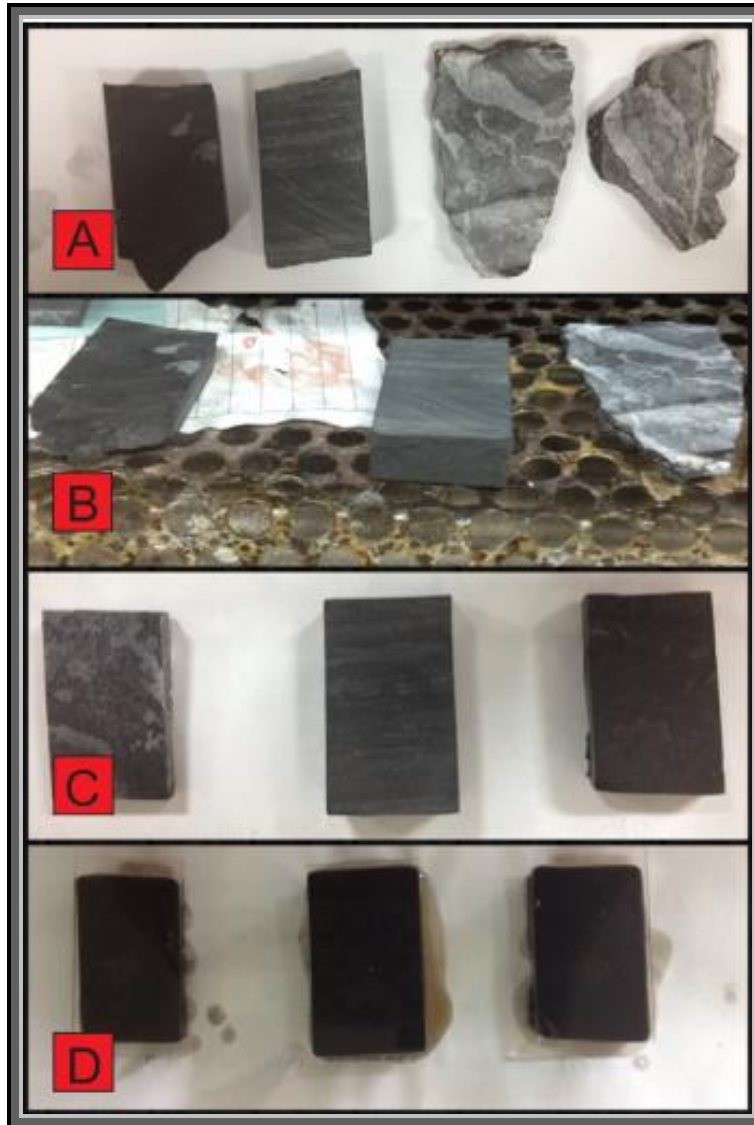
La elaboración de las láminas delgadas y su correspondiente estudio mineralógico-petrográfico, se llevaron a cabo en los laboratorios de preparación de muestras y en el laboratorio de microscopía óptica de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Los implementos usados para la elaboración de las secciones se aprecian en la figura 14. En la figura 14 se aprecia el proceso de elaboración de las secciones delgadas. Por otra parte el microscopio óptico utilizado con luz transmitida marca *Nikon Eclipse E 200* incorporado con Cámara Digital modelo DS-L1 (análisis petrográfico) aparece en la figura 13.

**Figura 13:** A) Cortadora marca minesecar 2, ROW-RATHENO. B) pulidora para alúmina marca MONTASUPAL. C) pulidora marca BUEHLER LTD. D) horno de secado marca BUEHLER LTD.



*Fuente: Los autores.*

**Figura 14:** *Proceso de elaboración de secciones delgadas. A) Se pule la muestra hasta obtener una superficie lisa. B) Se introduce en el horno. C) se pule la muestra para poder ponerle el vidrio. C) se pega el vidrio para seguir el proceso de pulido y llevar la sección a un valor igual o cercano de 2 micras.*



*Fuente: Los autores.*

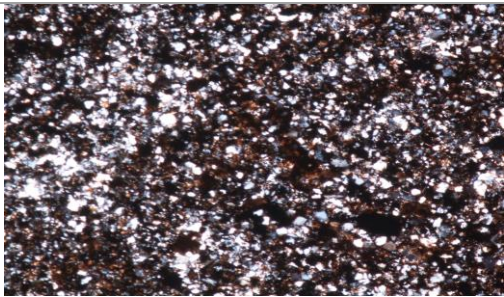
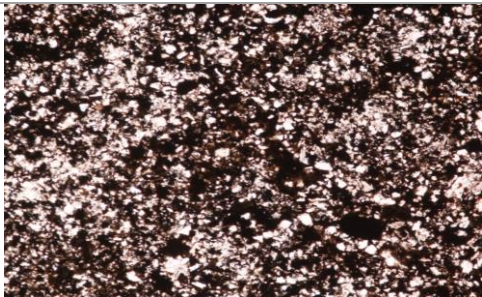
**Figura 15.** *Microscopio de luz transmitida marca Nikon Eclipse E200/50PO con cámara y pantalla incorporada los cuales se utilizaron para describir las secciones.*



*Fuente: Los autores.*

## Muestra Yp1

**Tabla 7:** Análisis de la sección delgada correspondiente a la muestra Yp1 (Lutita)

Secciones delgadas, Mina "El Diviso", Los Santos, Santander.			
MUESTRA No	YP1		
UBICACIÓN	X	Y	Z
	6°764.055	-73°184.600	619 msnm
TIPO	Roca Sedimentaria		
CLASE	Química		
COMPOSICION	MINERALES PRESENTES	DESCRIPCION	
	Cuarzo Calcita Yeso Ortoclasa Moscovita	En la muestra se observaron en el microscopio con un aumento de 5x minerales de cuarzo principalmente estos tenían forma anhedral, también se identificaron en menor valor minerales de moscovita y ortoclasa, por el tamaño y lo oxidados de algunos de los minerales fue difícil la identificación de todos estos.	
CLASIFICACION	Lutita		
Nicoles Cruzados		Nicoles Paralelos	
			

*Fuente: Los autores.*

## Muestra Yp2

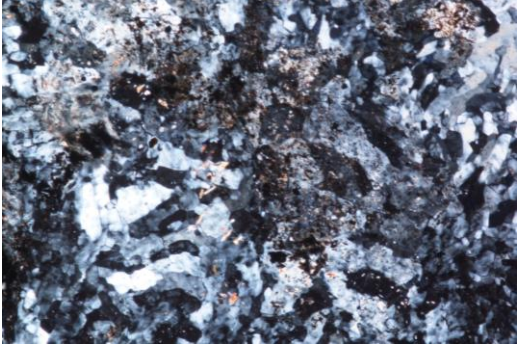
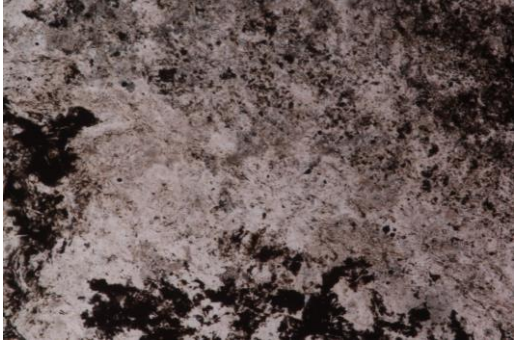
**Tabla 8:** Análisis de la sección delgada correspondiente a la muestra Yp2 (Lutita)

Secciones delgadas, Mina "El Diviso", Los Santos, Santander.			
MUESTRA No	YP2		
UBICACIÓN	X	Y	Z
	6´764.055	-73´184.600	619 msnm
TIPO	Roca Sedimentaria		
Clase	Química		
COMPOSICION	DESCRIPCION		
	Se observo bajo el micorscopio con un aumento de 5X una muestra con alto contenido de minerales ferromagnesianos, los cristales no pudieron ser plenamente identificados por el tamaño de grano y la oxidacion presente. Por tanto nos apoyamos en las pruebas de DRX para una identificacion mineral mas exacta.		
CLASIFICACION	Lutita		
Nicoles Cruzados		Nicoles Paralelos	
			

*Fuente: Los autores.*

### Muestra Yp3

**Tabla 9:** Análisis de la sección delgada correspondiente a la muestra Yp3 (Yeso)

Secciones delgadas, Mina "El Diviso", Los Santos, Santander.			
MUESTRA No	YP3		
UBICACIÓN	X	Y	Z
	6°764.055	-73°184.600	619 msnm
TIPO	Roca Sedimentaria		
Clase	Química		
COMPOSICION	MINERAL	DESCRIPCION	
	Cuarzo Calcita Yeso	En la muestra se observan minerales de cuarzo, calcita y yeso principalmente.  Los cristales presentan formas irregulares a alargadas.	
CLASIFICACION	Yeso		
Nicoles Cruzados		Nicoles Paralelos	
			

*Fuente: Los autores*

#### 5.4. Análisis De Resultados De Ensayos De Rayos X

Se cortaron y pulverizaron muestras de los tres tipos de material encontrados en la Mina “El Diviso”. Posteriormente fueron llevadas a los laboratorios de la UIS en la sede Guatiguara en donde se les realizaron los diferentes procedimientos.

- **Difracción de Rayos X (DRX)**

La difracción de rayos X (DRX) es una de las técnicas más eficaces para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases cristalinas de cualquier tipo de material, tanto natural como sintético. Los Rayos X son una radiación electromagnética de longitud de onda corta producida por el frenado de electrones de elevada energía o por transiciones electrónicas de estos cuando se encuentran en los orbitales más internos. El intervalo de longitudes de onda de los Rayos X comprende desde aproximadamente  $10^{-9}$  Å hasta 100 Å, sin embargo, la espectroscopia de rayos x convencional se limita a la región comprendida entre 0,1 Å a 25 Å.

La Difracción de Rayos X es una técnica consistente en hacer pasar un haz de rayos x a través de un cristal de la sustancia sujeta a estudio. El haz incide en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos y, por difracción, da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal, aplicando la Ley de Bragg.

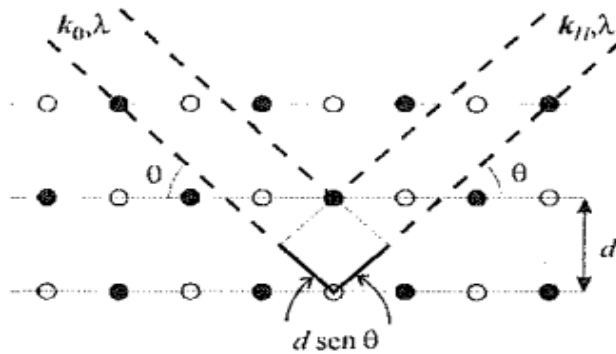
Una de las limitaciones de esta técnica es que solo se puede usar en materiales cristalinos, por lo tanto, no puede ser usada en sustancias como gases, disoluciones, a sistemas amorfos, entre otros.

La Ley de Bragg permite estudiar las direcciones en las que la difracción de rayos x sobre la superficie de un cristal produce interferencias constructivas, al predecir los ángulos en que los rayos x son difractados por un material cristalino.

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

La Ley de Bragg nos relacionaba la longitud de onda ( $\lambda$ ) de un haz incidente de rayos x sobre el material a analizar con el ángulo que produce difracción ( $\theta$ ) en una serie de planos cristalinos del material con una separación determinada ( $d$ ).

**Figura 16.** Representación esquemática de la Ley de Bragg



Fuente: Sanz, A.; 1995.

Podemos agrupar los puntos de la red en un conjunto de planos paralelos entre sí separados una distancia  $d$  que se llamaran planos de reflexión. Supongamos ahora que un haz de rayos X con una longitud de onda  $\lambda$  incide sobre el medio cristalino con un ángulo  $\theta$  y que cada punto de la red reemite la radiación con la misma longitud de onda. Cada una de las ondas emitidas por cada punto de la red interfieren entre sí, y la amplitud de la onda total resultante tomará el valor máximo cuando todas las ondas interfieran constructivamente (estén en fase). Esta condición se cumple cuando la diferencia en el camino óptico recorrido por cada onda es un número entero  $n$  de veces la longitud de onda de la radiación, es decir,  $n\lambda = 2d \sin\theta$ , expresión conocida como ley de Bragg, donde  $\theta$  es el ángulo de Bragg y  $n$  se denomina orden de la reflexión.

Esta Ley es muy importante, puesto que confirma la existencia de partículas a escala atómica, proporcionando una técnica muy poderosa en la exploración de la materia.

### 5.4.1 Generalidades

- **Preparación y Montaje de las muestras**

Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38  $\mu\text{m}$  (400 mesh). El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un porta muestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.

- **Toma de datos de difracción**

Se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:

**Tabla 10:** *Condiciones de los materiales (Yeso, Lutita) para la toma de datos de difracción.*

Voltaje	40(kV)
Corriente	30(mA)
Rendija de Divergencia	0.6mm
Rendijas Soller Primario	2.5°
Muestreo	0.01526° 2theta
Rangos de Medición	3.5-70° 2theta
Radiación	CuKa1
Filtro	Níquel
Detector	Lineal LynxEye
Tipo de barrido	A pasos
Tiempo de muestreo	0.4 segundos

*Fuente: Laboratorio de difracción de rayos x de la UIS- Guatiguara.*

- **Tipo de Análisis**

Análisis Cualitativo

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

**5.4.2 Resultados de las pruebas**

A continuación se presentan los resultados de laboratorio de rayos x realizados a cada una de las muestras.

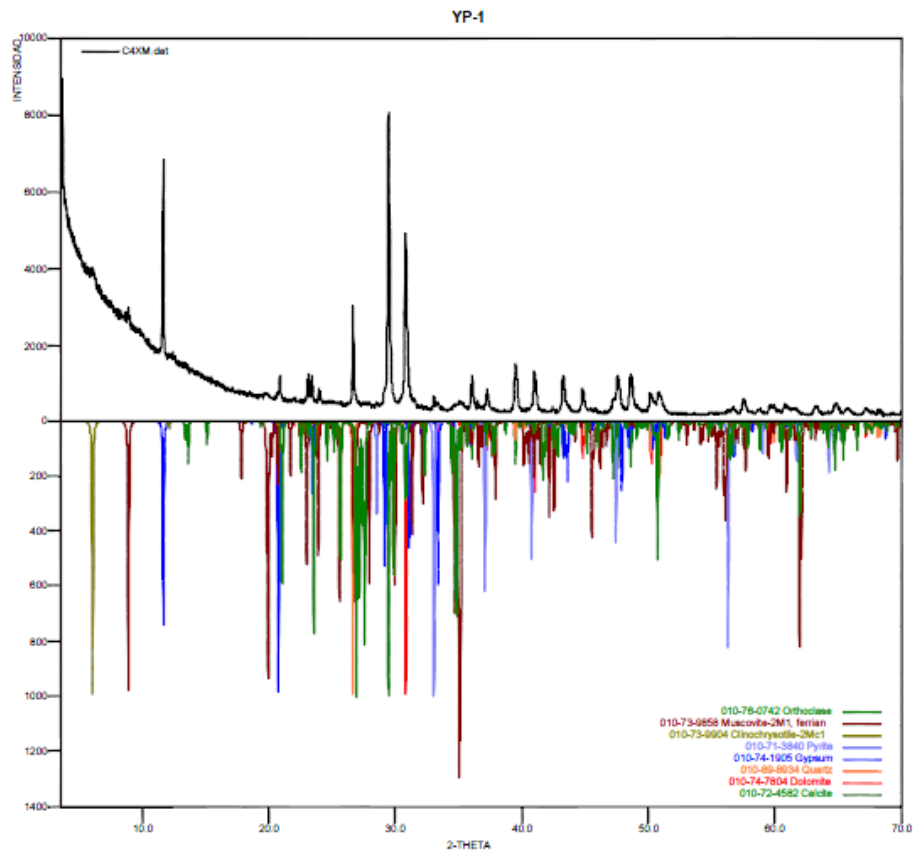
- **Muestra Yp1**

**Tabla 11:** *Fases minerales presentes en la muestra de Lutita compacta.*

	<b>FASE</b>	<b>No. TARJETA PDF-2</b>	<b>NOMBRE</b>
<b>Cristalinos</b>	Si O <sub>2</sub>	010-89-8934	Cuarzo
	Ca ( CO <sub>3</sub> )	010-72-4582	Calcita
	Ca ( Ca <sub>0.14</sub> Mg <sub>0.86</sub> ) ( CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	010-74-7804	Dolomita
	Fe S <sub>2</sub>	010-71-3840	Pirita
	Ca ( SO <sub>4</sub> ) ( H <sub>2</sub> O ) <sub>2</sub>	010-74-1905	Yeso
	Mg <sub>3</sub> ( Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) ( OH ) <sub>4</sub>	010-73-9904	Clinocrisotilo
	K ( Al Si <sub>3.02</sub> O <sub>8</sub> )	010-76-0742	Ortoclasa
	K <sub>0.92</sub> Na <sub>0.08</sub> Al <sub>1.78</sub> Fe <sub>0.22</sub> ( Al <sub>0.82</sub> Si <sub>3.18</sub> O <sub>10</sub> ) ( OH ) <sub>2</sub>	010-73-9858	Moscovita

*Fuente: Laboratorio de difracción de rayos x de la UIS- Guatiguara.*

**Gráfico 2:** Grafico de los minerales presentes en la muestra-DRX.



Fuente: Laboratorio de difracción de rayos x de la UIS- Guatiguara.

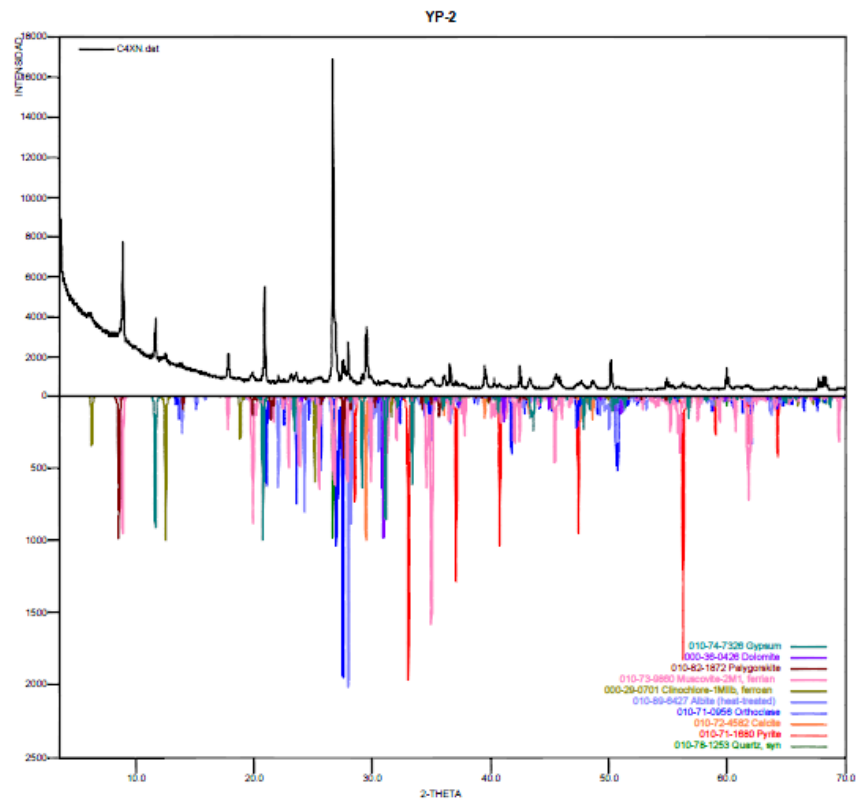
- Muestra Yp2

**Tabla 12.** Fases minerales presentes en la muestra de Lutita fisil.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
<b>Cristalinos</b>	Si O <sub>2</sub>	010-78-1253	Cuarzo
	Ca ( CO <sub>3</sub> )	010-72-4582	Calcita
	Ca Mg ( CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	000-36-0426	Dolomita
	Fe S <sub>2</sub>	010-71-1680	Pirita
	Ca ( SO <sub>4</sub> ) ( H <sub>2</sub> O ) <sub>2</sub>	010-74-7326	Yeso
	( Mg, Fe ) <sub>6</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>8</sub>	000-29-0701	Clinocloro
	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	010-89-6427	Ortoclasa
	(Mg <sub>0.669</sub> Al <sub>0.331</sub> ) <sub>4</sub> ( Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> ( OH ) <sub>2</sub> ( H <sub>2</sub> O ) <sub>8</sub>	010-82-1872	Paligorskita
	Na ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-89-6427	Albita
	K <sub>0.92</sub> Na <sub>0.08</sub> Al <sub>1.86</sub> Fe <sub>0.14</sub> ( Al <sub>0.97</sub> Si <sub>3.03</sub> O <sub>10</sub> ) ( OH ) <sub>2</sub>	010-73-9860	Moscovita

*Fuente: Laboratorio de difracción de rayos x de la UIS- Guatiguara.*

**Gráfica 3:** Grafico de los minerales presentes en la muestra-DRX.



Fuente: Laboratorio de difracción de rayos x de la UIS- Guatiguara

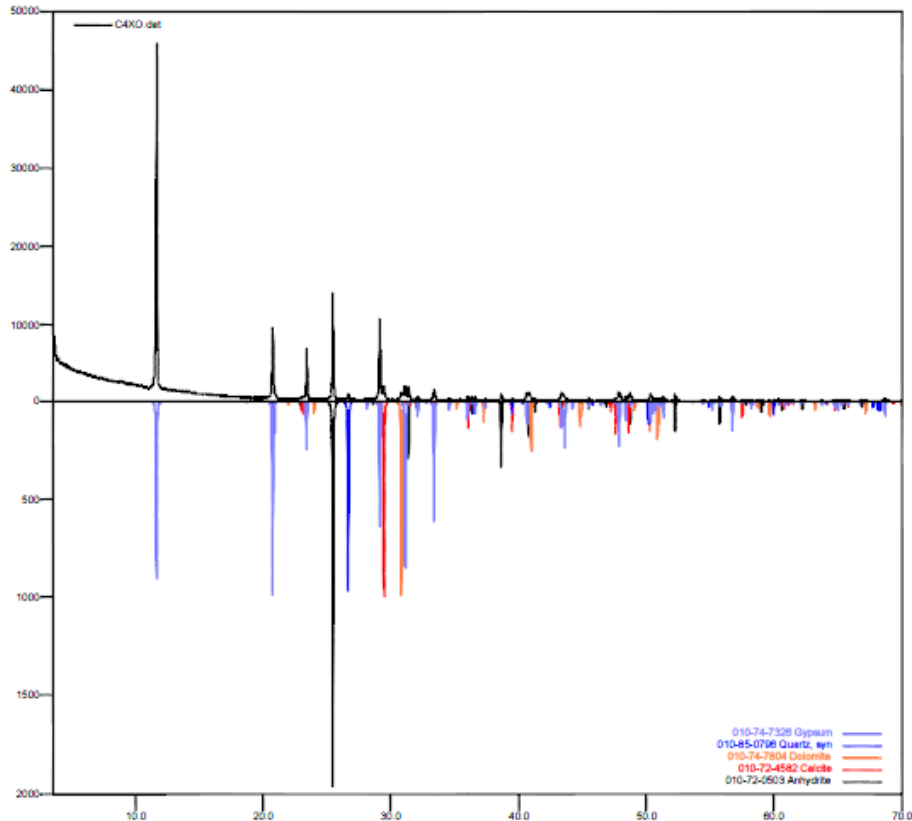
- **Muestra Yp3**

**Tabla 13:** Fases minerales presentes en la muestra de Yeso.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
<b>Cristalinos</b>	Si O2	010-85-0796	Cuarzo
	Ca ( CO3 )	010-72-4582	Calcita
	Ca ( Ca0.14 Mg0.86 ) ( CO3 )2	010-74-7804	Dolomita
	Ca ( SO4 )	010-720503	Anhidrita
	Ca ( SO4 ) ( H2O )2	010-74-7326	Yeso

Fuente: Laboratorio de difracción de rayos x de la UIS- Guatiguara.

Gráfica 4: Grafico de los minerales presentes en la muestra-DRX.



Fuente: Laboratorio de difracción de rayos x de la UIS- Guatiguará.

Las pruebas de rayos x arrojan en cada una de las muestras fases de minerales silíceos, lo que nos indica que estos podrían reaccionar con los álcali contenidos en el cemento.

### 5.5 Análisis De Resultados De Ensayos De Microscopia Electrónica De Barrido (Sem)

La microscopia electrónica de barrido o SEM se basa en el principio de la microscopia óptica en la que se sustituye el haz de luz por un haz de electrones. Con esto conseguimos hasta los 100 Å, resolución muy superior a cualquier instrumento óptico.

Su funcionamiento consiste en hacer incidir un barrido de haz de electrones sobre la muestra. La muestra (salvo que ya sea conductora) está generalmente recubierta con una capa muy fina de oro o carbón, lo que le otorga propiedades conductoras. La técnica de preparación de las muestras se denomina “sputtering” o pulverización catódica.

Al alcanzar el haz la superficie de la muestra se generan principalmente las siguientes partículas

- Electrones retrodispersados (e1)
- Electrones secundarios (e2)

Además de radiación electromagnética (rayos X) y otras partículas menos significativas.

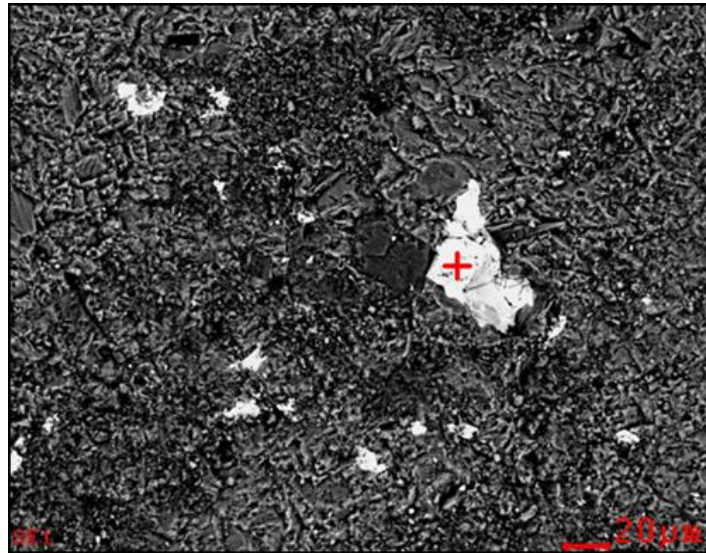
El microscopio se encuentra internamente equipado con unos detectores que recogen la energía y la transforman en las siguientes imágenes y datos:

- Detector de electrones secundarios: (SEI – Secondary Electron Image) con los que obtenemos las imágenes de alta resolución.
- Detector de electrones retrodispersados: (BEI – Backscattered Electron Image) Con menor resolución de imagen pero mayor contraste para obtener la topografía de la superficie.
- Detector de energía dispersiva: (EDS – Energy Dispersive Spectrometer) detecta los rayos X generados y permite realizar un análisis espectrográfico de la composición de la muestra.

- **Muestra YP1**

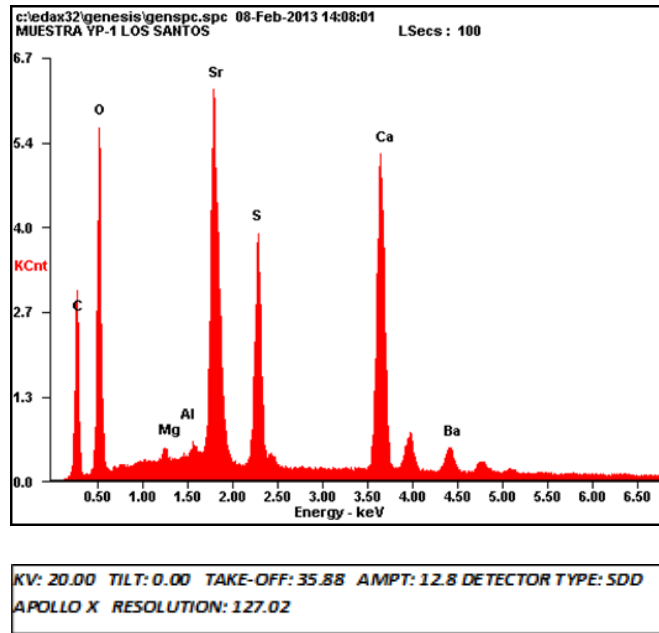
En las siguientes fotografías se muestra el análisis de la muestra YP1 (Lutita compacta), se hace enfoque en el fragmento sobre el que se realiza el examen de composición que aparece en la gráfica y la tabla adjunta para cada imagen.

**Figura 17.** *Imagen con enfoque en el elemento en el que se realiza el examen de composición.*



*Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguara.*

**Grafica 5.** Espectrograma de la muestra mostrando su composición química simple.



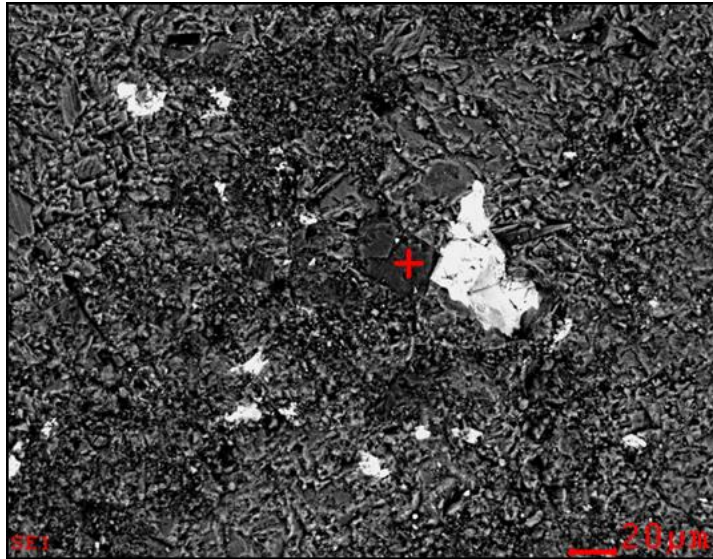
*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

**Tabla 14:** Elemento, porcentaje en peso y atómico de dicho elemento.

Element	Wt %	At %
C K	25.18	41.41
O K	35.82	44.24
MgK	00.34	00.27
AlK	00.17	00.12
SrL	16.26	03.67
S K	06.14	03.79
CaK	11.99	05.91
BaL	04.10	00.59

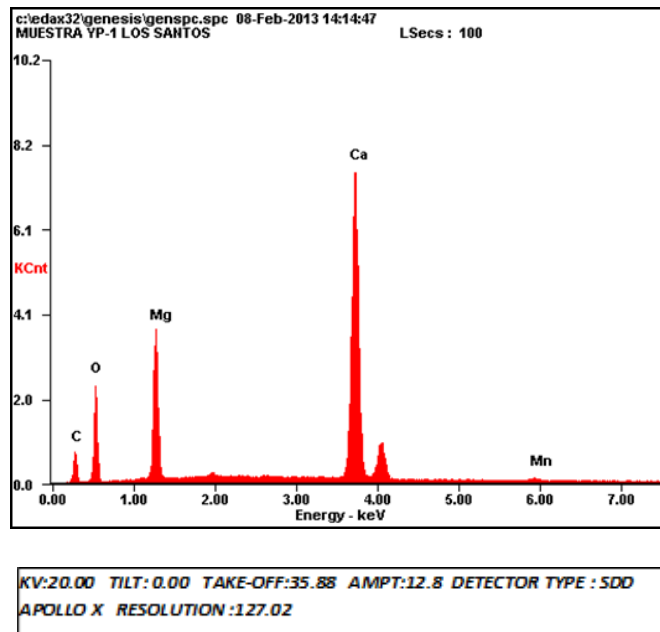
*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

**Figura 18.** Imagen con enfoque en el elemento en el que se realiza el examen de composición.



*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

**Grafica 6.** Espectrograma de la muestra mostrando su composición química simple.



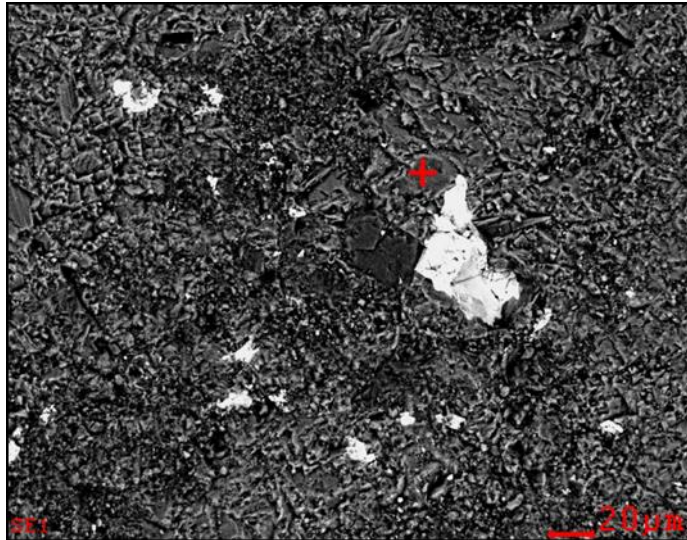
*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

**Tabla 15: Elemento, porcentaje en peso y atómico de dicho elemento**

Element	Wt %	At %
C K	09.43	16.65
O K	38.96	51.64
MgK	13.18	11.50
CaK	37.52	19.86
<b>MnK</b>	00.90	00.35

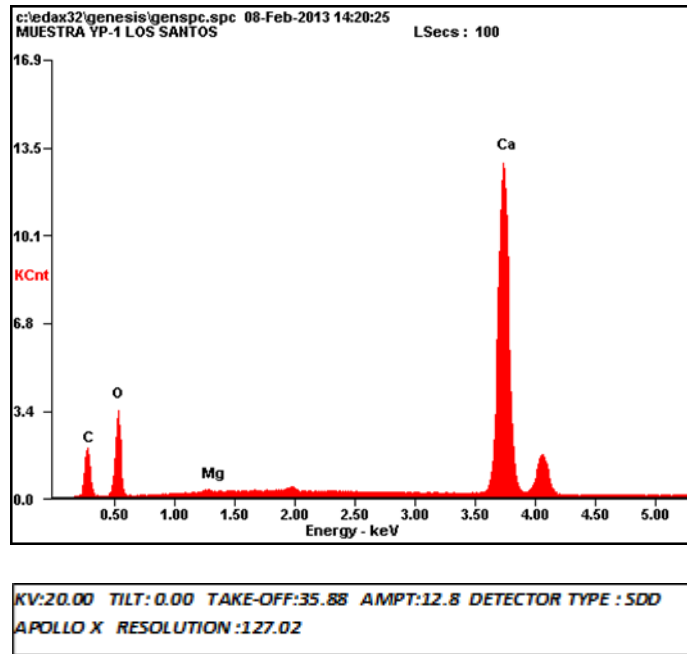
*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

**Figura 19.** *Imagen con enfoque en el elemento en el que se realiza el examen de composición.*



*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

**Grafica 7.** Espectrograma de la muestra mostrando su composición química simple



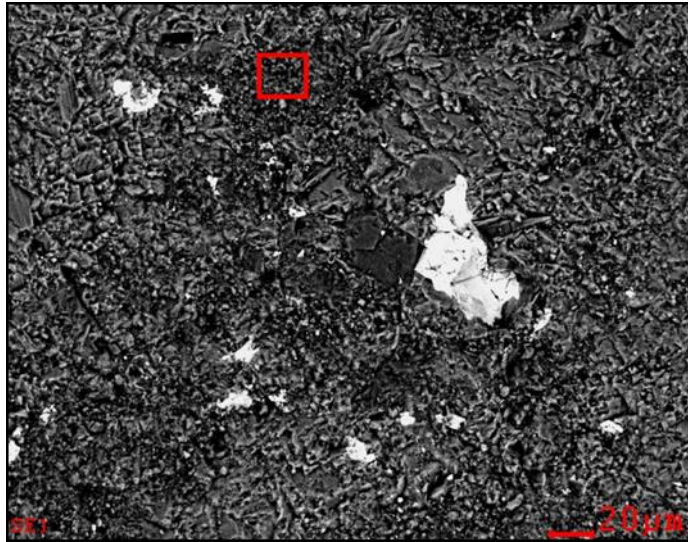
*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

**Tabla 16:** Elemento, porcentaje en peso y atómico de dicho elemento.

Element	Wt %	At %
C K	12.30	21.25
O K	42.61	55.25
MgK	00.48	00.41
CaK	44.61	23.09

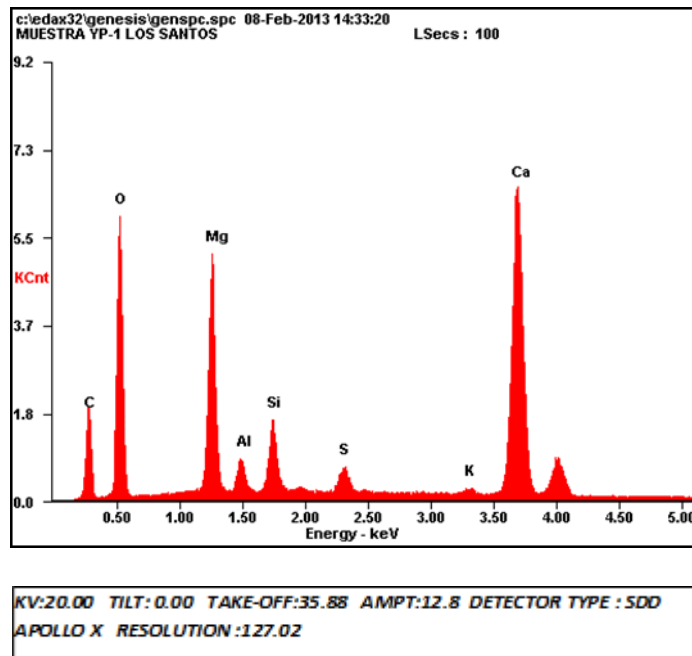
*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

**Figura 20.** Imagen con enfoque en el elemento en el que se realiza el examen de composición.



Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.

**Grafica 8.** Espectrograma de la muestra mostrando su composición química simple



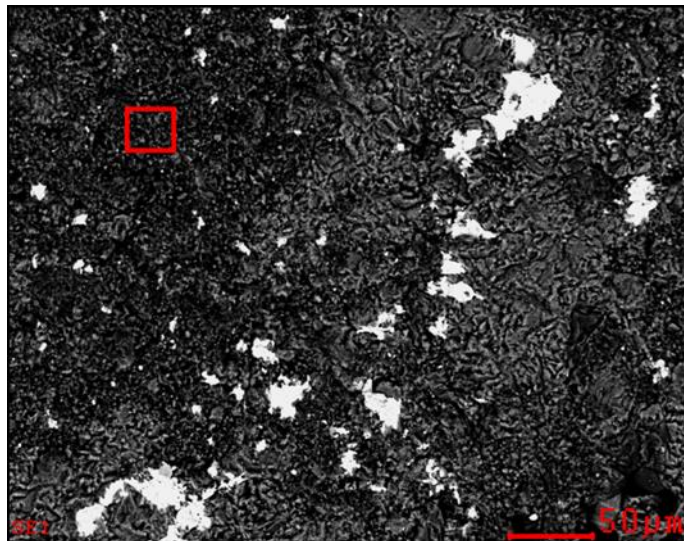
Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.

**Tabla 17:** Elemento, porcentaje en peso y atómico de dicho elemento.

Element	Wt %	At %
C K	16.63	25.46
O K	46.51	53.45
MgK	10.37	07.84
AlK	01.55	01.06
SiK	03.18	02.08
S K	01.08	00.62
K K	00.30	00.14
CaK	20.39	09.35

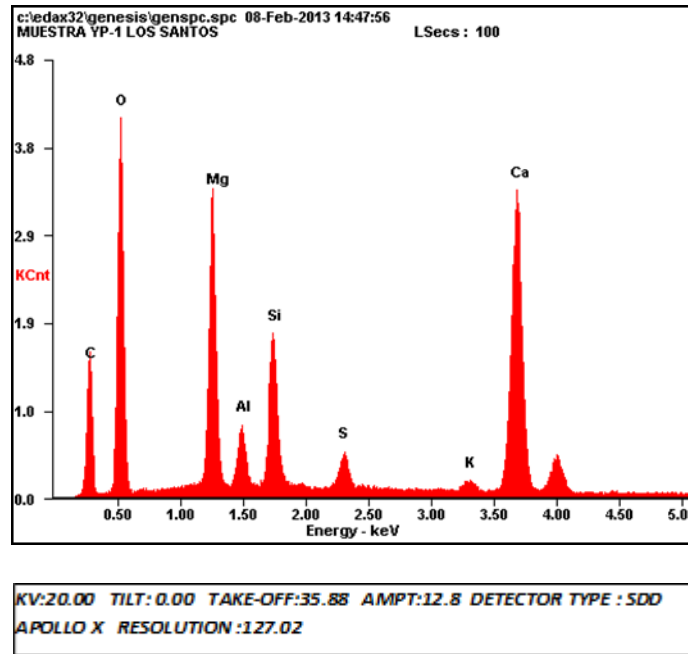
*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

**Figura 21.** Imagen con enfoque en el elemento en el que se realiza el examen de composición.



*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

**Grafica 9.** Espectrograma de la muestra mostrando su composición química simple



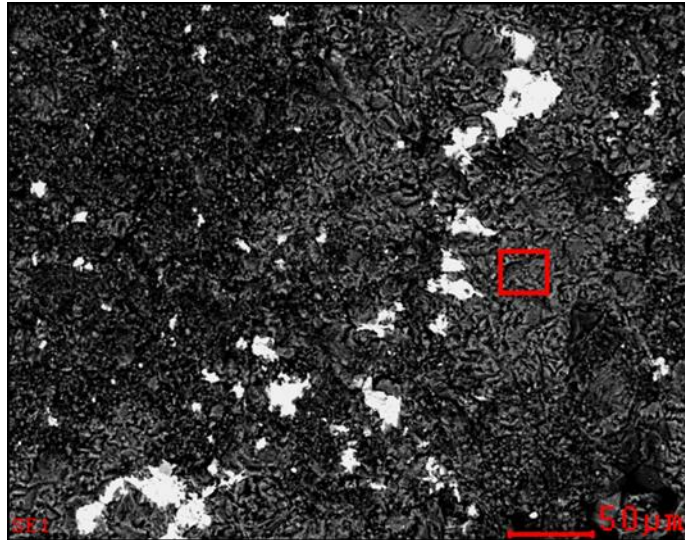
Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.

**Tabla 18:** Elemento, porcentaje en peso y atómico de dicho elemento.

Element	Wt %	At %
C K	20.66	30.52
O K	45.01	49.91
MgK	09.85	07.18
AlK	02.02	01.33
SiK	05.17	03.27
S K	01.27	00.70
K K	00.46	00.21
CaK	15.56	06.89

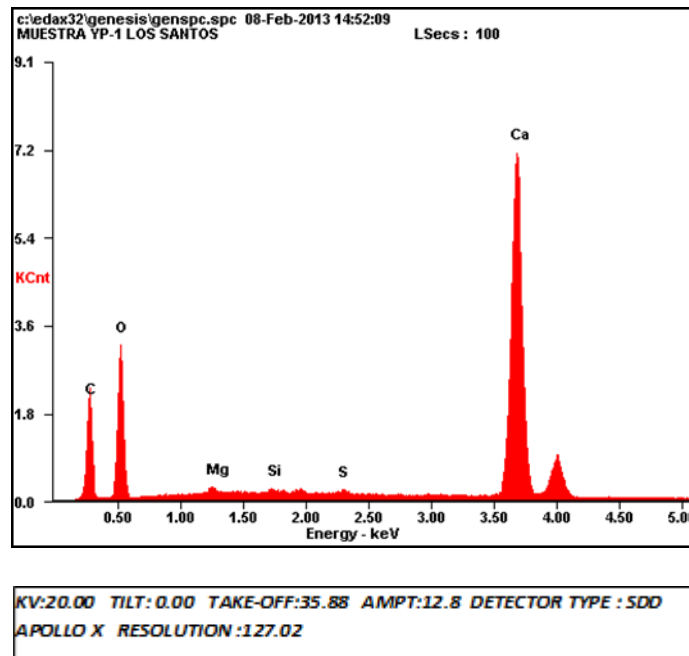
Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.

**Figura 22.** Imagen con enfoque en el elemento en el que se realiza el examen de composición.



Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.

**Grafica 10.** Espectrograma de la muestra mostrando su composición química simple



Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.

**Tabla 19:** *Elemento, porcentaje en peso y atómico de dicho elemento.*

Element	Wt %	At %
C K	18.08	28.27
O K	46.93	55.10
MgK	00.50	00.39
SiK	00.25	00.16
S K	00.24	00.14
CaK	34.02	15.94

*Fuente: Laboratorio de SEM – UIS, Guatiguara.*

## **5.6 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE TECNICAS ANALITICAS DE GRAVIMETRÍA PARA LA MUESTRA DE LUTITA NO FISIL.**

### **5.6.1 TECNICAS ANALITICAS DE GRAVIMETRIA**

Se aplicaron técnicas analíticas para la determinación de ceniza y humedad, porcentajes de: SiO<sub>2</sub>, Ca y R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a la muestra de Lutita no fisil, por ser de las dos muestras residuales presentes en la mina la que contaba con más potencial para su uso en la industria de la construcción.

En la tabla 14 se hace una compilación de los materiales y los reactivos usados para cada práctica aplicada a la muestra.

**Tabla 20:** *Materiales y los reactivos usados para cada práctica aplicada a la muestra de Lutita.*

Practica	Materiales	Reactivos
Determinación de ceniza y humedad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crisol</li> <li>• Caja Petri</li> <li>• Balanza sensible               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estufa</li> <li>• Mufla</li> </ul> </li> <li>• Desecador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra pulverizada</li> </ul>
Determinación gravimétrica de SiO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza sensible</li> <li>• Vaso de precipitado</li> <li>• Placa calefactora</li> <li>• Papel filtrador</li> <li>• Soporte universal               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Embudo</li> </ul> </li> <li>• Balón aforado               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crisol</li> <li>• Mufla</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ácido Clorhídrico (1:1)</li> <li>• Ácido Clorhídrico concentrado y analítico</li> </ul>
Determinación gravimétrica de calcio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bureta o pipeta aforada</li> <li>• Vaso de precipitado</li> <li>• Placa calefactora</li> <li>• Papel filtrador</li> <li>• Soporte universal               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Embudo</li> </ul> </li> <li>• Balón aforado               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crisol</li> </ul> </li> <li>• Balanza sensible               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mufla</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rojo de metilo</li> <li>• Oxalato de amonio al 5%</li> <li>• Amoniaco concentrado</li> <li>• Oxalato de amonio al 0.1%</li> </ul>

<p style="text-align: center;">Determinación gravimétrica de óxidos de hierro y aluminio (<math>R_2O_3</math>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bureta o pipeta aforada</li> <li>• Vaso de precipitado</li> <li>• Placa calefactora</li> <li>• Papel filtrador</li> <li>• Soporte universal <ul style="list-style-type: none"> <li>• Embudo</li> </ul> </li> <li>• Balón aforado <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crisol</li> </ul> </li> <li>• Balanza sensible <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mufla</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rojo de metilo</li> <li>• Cloruro de amonio (<math>NH_4Cl</math>) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amoniaco</li> </ul> </li> <li>• Nitrato de amonio (<math>NH_4NO_3</math>) al 2%</li> </ul>
--	---	--

*Fuente: Los autores.*

En la tabla 21 se detalla los resultados obtenidos en el laboratorio para cada técnica analítica.

**Tabla 21:** Resultados obtenidos en el laboratorio para cada técnica analítica.

TÉCNICA ANALÍTICA	RESULTADOS
DETERMINACIÓN DE CENIZA Y HUMEDAD	<p style="text-align: center;"><b>Humedad</b></p> <p>Peso caja Petri vacía: 13,885 g            Peso caja Petri + muestra: 14,9944 g            Peso muestra húmeda: 1,1094 g            Peso muestra seca: 1,0845 g</p> <p style="text-align: center;"><b>Ceniza</b></p> <p>Peso crisol vacío: 16,2885 g            Peso crisol + muestra: 18,0421 g            Peso muestra: 1,7536 g            Peso crisol + residuo: 17,9040 g            Peso residuo: 1,6155 g</p>
DETERMINACIÓN GRAVIMÉTRICA DE SiO <sub>2</sub>	<p>Peso de la muestra inicial: 1,269 g            Peso del crisol + muestra: 17,5302 g            Peso del crisol + precipitado: 16,7550 g            Peso del precipitado: (17,5302 – 16,7550)= 0,7752 g</p>
DETERMINACIÓN GRAVIMÉTRICA DE CAO	<p>Peso de la muestra inicial: 1.269 g            Peso del crisol vacío: 21,2771 g            Peso del crisol + precipitado: 21.2804 g            Peso del precipitado: (21.2804 – 21.2771)= 0.0033 g</p>
DETERMINACIÓN GRAVIMÉTRICA DE R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<p>Peso del crisol + muestra: 16,7786 g            Peso del crisol + precipitado: 16,7433 g            Peso del precipitado: (16,7433 – 16,7786)= 0.0353 g</p>

*Fuente: Los autores.*

Los procedimientos aplicados para cada técnica fueron los siguientes:

- **DETEMINACION DE CENIZA Y HUMEDAD**

Se toma la caja Petri, se lleva al horno y se calienta por unos minutos, después se lleva el crisol a la placa de calentamiento, esto con el fin de eliminar humedad y otros elementos que interfieran en el peso real de los instrumentos. Luego de calentar el crisol se deposita dentro del desecador para que se enfríe por completo. Luego se pone el crisol con la muestra en la mufla por hora y media a una temperatura entre 550-600°C. Esto se hace para determinar ceniza; después se saca la caja Petri de la estufa para ubicarla en el desecador hasta que se enfríe, y se pesa. Por último se toma entre 2 y 3 gramos de la muestra y se lleva a la estufa por 2 horas, esto con el fin de determinar humedad.

- **DETERMINACIÓN DE SILICE (SiO<sub>2</sub>)**

Se tomó un peso de muestra pulverizada de 1,269 g en el vidrio reloj, luego se pasó a un vaso de precipitado atacando la muestra con HCl para precipitar el SiO<sub>2</sub>, se calentó hasta el punto de ebullición y se le adiciono HCl concentrado, se dejó enfriar totalmente. Luego se agregó agua caliente sobre el vaso con la muestra y al finalizar el filtraje se aforo el balón a 250 ml y con el papel tornasol se midió el pH de la muestra. El crisol se calentó en la estufa, después se llevó al desecador y se pesó, acto seguido se le introdujo el papel con el filtrado, se caliente en la estufa, luego en la mufla hasta obtener el SiO<sub>2</sub> y para finalmente pesarlo.

- **DETERMINACIÓN DE R2O3**

Se toma 50 ml de la muestra en un vaso de precipitado y se le adiciona retazos de papel filtro con 3 gotas de rojo-metilo, esto se lleva a calentar a las estufa, después de esto en el soporte se coloca el embudo con papel filtro y se filtra en el

Erlenmeyer, luego el vaso con la muestra se lava con 10 ml de nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) agregándolo nuevamente al embudo y se hace un nuevo lavado con agua destilada y que se va agregando al embudo, esto con el fin de que en el vaso no quede residuos de la muestra si no que por el contrario toda ella pase por el filtro.

Luego de haber filtrado por completo la muestra, el papel filtro se deposita en el crisol y éste se lleva a la estufa por 10 minutos y luego de esto se lleva a la mufla hasta calcinar completamente.

- **DETERMINACION DE CaO**

Se toman 25 ml de la muestra agregándole 2 gotas de rojo de metilo, antes el crisol ha sido debidamente lavado, calentado en la estufa, y luego secado y enfriado en el desecador, acto seguido se pesa en la balanza. Luego se miden 15 ml de oxalato de amonio al 0.5 % para precipitar el calcio. La solución inicial de 25 ml es llevada a la plancha a calentar y cuando hierve se le agregan los 15 ml de oxalato de amonio, y se revuelve con la varilla agitadora.

Se arma el soporte para filtrar el vaso del precipitado con 25 ml de oxalato de amonio al 0,1 %, y esto se va lavando con agua destilada para no dejar residuo alguno de la muestra en el vaso.

En la tabla 22 se muestran los cálculos realizados para hallar los resultados de cada técnica analítica aplicada a la muestra.

**Tabla 22:** Cálculos realizados para hallar los resultados de cada técnica analítica aplicada a la muestra.

Técnica Analítica	Calculo
Humedad	$\frac{\text{muestra húmeda} - \text{muestra seca}}{\text{Peso de la muestra}} * 100 = \frac{0,0249 \text{ g}}{1,7536 \text{ g}} * 100 = 1,41 \%$
Ceniza	$\frac{\text{peso residuo}}{\text{Peso de la muestra}} * 100 = \frac{1,6155 \text{ g}}{1,7536 \text{ g}} * 100 = 92,12\%$
Determinación gravimétrica de SiO <sub>2</sub>	$\%SiO_2 = \frac{\text{Peso del precipitado}}{\text{Peso de la muestra}} * 100 = \frac{0,7752 \text{ g}}{1,269 \text{ g}} * 100 = 61,08\%$
Determinación gravimétrica de CaO	$\%CaO = \frac{\text{Pesodelprecipitado}}{\text{Pesodelamuestra}} * 100 = \frac{0,0033 \text{ g}}{1,269 \text{ g}} * 100 = 0,26\%$
Determinación gravimétrica de R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\%R_2O_3 = \frac{\text{Peso del precipitado}}{\text{Peso de la muestra}} * 100 = \frac{0,0353 \text{ g}}{1,269 \text{ g}} * 100 = 2,78\%$

Fuente: Los Autores.

## 5.7 Análisis De Resultados De Ensayos De Resistencia

Para la preparación del agregado grueso, y posterior realización de las probetas, primero se procedió a llevar las muestras de mano de Lutita compacta a un tamaño razonable para que pudieran ser trituradas por la trituradora de mandíbulas marca *BB 200 RETSCH*, luego el material obtenido se tamizó por un tamiz número 4mm, ya obteniendo un agregado de tamaño uniforme para la preparación de los cilindros.

**Figura 23:** *trituradora de mandíbulas marca BB 200 RETSCH.*



*Fuente: Los autores.*

En el laboratorio de suelos (Ingeniería Civil) de la UIS se hizo la preparación de la mezcla que se utilizaría para la elaboración de las probetas, las cuales estarían

conformadas por agua, cemento, arena y agregado grueso en este caso Lutita compactas. Se hicieron 4 mezclas distintas variando en cada una de ellas el contenido de arena y el de agregado grueso y manteniendo constante el contenido de agua y cemento, de cada una de las mezclas se realizaron 9 probetas para un total de 36 cilindros, después de realizados el número total de cilindros se dejan secar 24 horas y después de esto se depositan en un tanque de agua para después realizar las pruebas a los 7, 14 y 28 días.

**Figura 24:** *Proceso de elaboración de las probetas experimentales.*



*Fuente: Los Autores.*

**Figura 25:** Pruebas de resistencia a la compresión realizadas a las probetas experimentales.



Fuente: Los autores.

## PROBETAS

**Tabla 33:** Propiedades de las probetas.

Propiedades de las probetas	Valores
Altura (H)	15cm
Radio	3,75 cm
Volumen	$\pi r^2 H$
V	0,000670 m <sup>3</sup>

Fuente: Los Autores.

**Tabla 34:** *Materiales y su cantidad en gramos para la elaboración de las probetas.*

Si para  $1\text{m}^3 =$

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad en gramos</b>
Agua	1264
Cemento	2068
Arena	(variable)
Triturado	(variable)

*Fuente: Los Autores.*

### **Cilindros YM1**

Se hacen 9 probetas en las siguientes cantidades y se prueban así: 3 a 7 días, 3 a 14 días y 3 a 28 días.

Para  $0,000670\text{ m}^3$

**Tabla 35:** *Materiales y su cantidad en gramos para la elaboración de los cilindros YM1.*

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad en gramos</b>
Agua	1264
Cemento	2068
Arena	5036
Triturado	7504

*Fuente: Los Autores.*

### **Cilindros YM2**

Se hacen 9 probetas en las siguientes cantidades y se prueban así, 3 a 7 días, 3 a 14 días y 3 a 28 días.

Para 0,000670 m<sup>3</sup>

**Tabla 36:** *Materiales y su cantidad en gramos para la elaboración de las probetas YM2.*

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad en gramos</b>
Agua	1264
Cemento	2068
Arena	6974
Triturado	5566

*Fuente: Los Autores.*

### **Cilindros YM3**

Se hacen 9 probetas en las siguientes cantidades y se prueban así, 3 a 7 días, 3 a 14 días y 3 a 28 días.

Para 0,000670 m<sup>3</sup>

**Tabla 37:** *Materiales y su cantidad en gramos para la elaboración de las probetas YM3.*

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad en gramos</b>
Agua	1264
Cemento	2068
Arena	8829
Triturado	3711

*Fuente: Los Autores.*

### Cilindros YM4

Se hacen 9 probetas en las siguientes cantidades y se prueban así, 3 a 7 días, 3 a 14 días y 3 a 28 días.

Para 0,000670 m<sup>3</sup>

**Tabla 38:** *Materiales y su cantidad en gramos para la elaboración de las probetas YM4.*

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad en gramos</b>
Agua	1264
Cemento	2068
Arena	10685
Triturado	1855

*Fuente: Los Autores.*

### RESULTADOS “Ensayo a compresión de cilindros”

- Probetas que fueron probadas a los 7 días.

**Tablas 38:** *Resultado de compresión para las probetas probadas a los 7 días, para las muestras YM1, YM2, YM3 y YM4.*

<b>YM1 (kN)</b>	<b>kgF</b>	<b>kgF/área</b>	<b>PSI</b>
29,3	2988,6	67,64	966,29
26,9	2743,8	62,10	887,14
31,8	3243,6	73,41	1048,71

YM2 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
29,2	2978,4	67,41	963
32,6	3325,2	75,26	1075,14
29,5	3009	68,11	973

YM3 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
16,2	1652,4	37,40	534,29
16,5	1683	38,09	544,14
15,6	1591,2	36,02	514,57

YM4 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
5,6	571,2	12,92	184,57
5,1	520,2	11,77	168,14
5,3	540,6	12,24	174,86

*Fuente: Los Autores.*

- Promedio de esfuerzos

**Tablas 39:** *Resultado de promedio de compresión para las probetas probadas a los 7 días, para las muestras YM1, YM2, YM3 y YM4.*

Muestra	KN	KgF	KgF/área	PSI
YM1	29,33	2991,66	67,71	967,29
YM2	30,43	3103,86	70,25	1003,57
YM3	16,10	1642,2	37,17	531
YM4	5,33	543,66	12,31	175,86

- Probetas que fueron probadas a los 14 días.

**Tablas 40:** Resultado de compresión para las probetas probadas a los 14 días, para las muestras YM1, YM2, YM3 y YM4.

YM1 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
33,4	3406,8	77,11	1101,57
28,2	2876,4	65,11	930,14
26,4	2692,8	60,95	870,71

YM2 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
34	3468	78,50	1121,43
29,7	3029,4	68,57	979,57
38,6	3937,2	89,12	1273,14

YM3 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
14,7	1499,4	33,94	484,86
21,9	2233,8	50,57	722,43
17,4	1774,8	40,17	573,86

YM4 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
6,0	612	13,85	197,86
5,0	510	11,54	164,86
6,9	703,8	15,93	227,57

Fuente: Los Autores.

- Promedio de esfuerzos

**Tablas 41:** Resultado de promedio de compresión para las probetas probadas a los 14 días, para las muestras YM1, YM2, YM3 y YM4.

Muestra	KN	KgF	KgF/área	PSI
YM1	29,33	2991,66	67,72	967,43
YM2	34,1	3478,2	78,73	1124,71
YM3	18	1836	41,56	593,71
YM4	5,9	601,8	13,62	194,58

En la tabla 41 se tabulan los resultados promediados del ensayo a compresión, en la cual se detallan las resistencias alcanzadas de los cilindros de concreto a la edad de 14 días. Dichas resistencias alcanzan un 46,86% de la resistencia a los 14 días.

- Probetas que fueron probadas a los 28 días.

**Tablas 42:** Resultado de compresión para las probetas probadas a los 28 días, para las muestras YM1, YM2, YM3 y YM4.

YM1 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
40,6	4141,2	93,73	1339,06
31,1	3172,2	71,80	1025,73
36,6	3733,2	84,49	1207,14

YM2 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
51,9	5293,8	119,82	1711,76
26,5	2703	61,18	874,02
37,0	3774	85,42	1220,3

YM3 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
21,8	2223,6	50,33	719,00
25,9	2641,8	59,79	854,23
28,5	2907	65,79	939,98

YM4 (KN)	kgF	kgF/área	PSI
6,9	703,8	15,93	227,58
5,7	581,4	13,16	187,99
7,7	785,4	17,77	253,28

*Fuente: Los Autores*

- Promedio de esfuerzos

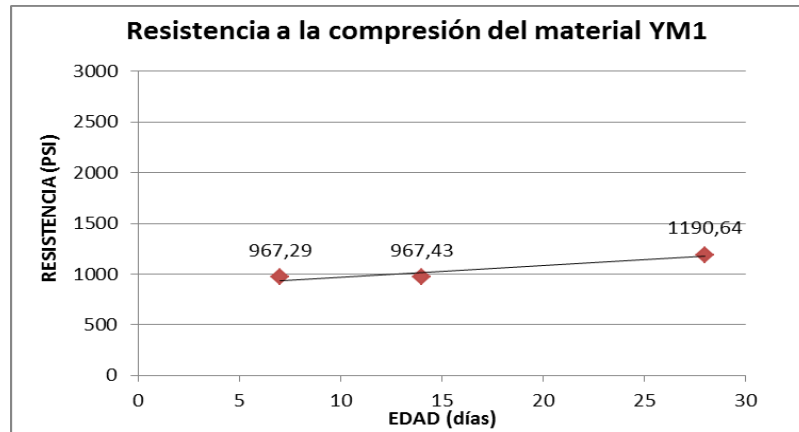
**Tablas 43:** *Resultado de promedio de compresión para las probetas probadas a los 28 días, para las muestras YM1, YM2, YM3 y YM4.*

Muestra	KN	KgF	KgF/área	PSI
YM1	36,1	3682,2	83,34	1190,64
YM2	38,46	3922,92	88,79	1268,48
YM3	25,4	2590,8	58,64	837,74
YM4	6,77	690,54	15,63	223,28

En la tabla 43 se tabulan los resultados promediados del ensayo a compresión, en la cual se detallan las resistencias alcanzadas de los cilindros de concreto a la edad de 28 días. Dichas resistencias alcanzan un 44,50% de la resistencia a los 28 días.

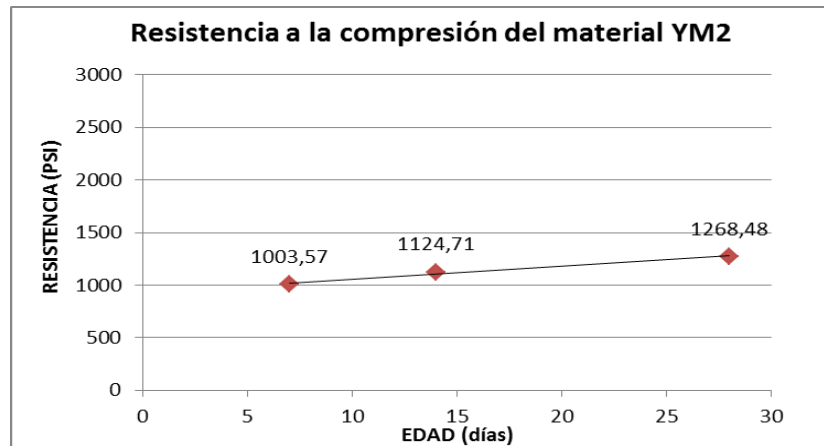
La resistencia a los 28 días es considerada casi como el máximo de tolerancia a compresión que puede soportar un elemento de concreto, sin embargo se sabe que el concreto sigue adquiriendo resistencia a la compresión hasta los 100 años.

**Grafico 11:** Resistencia a la compresión del material de agregado grueso muestra YM1



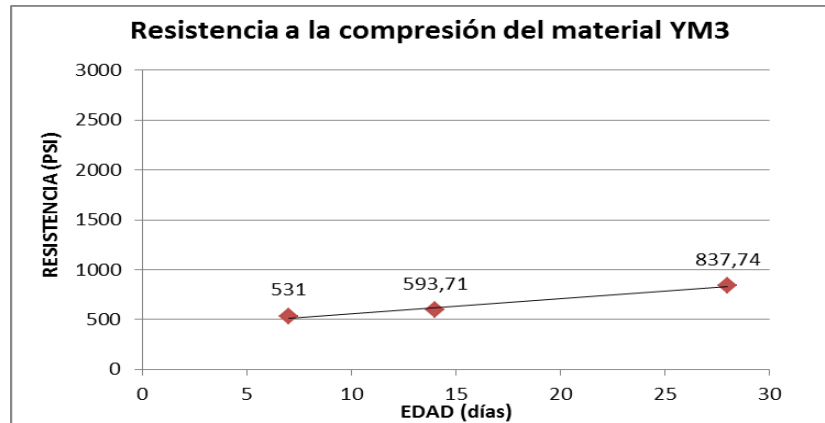
*Fuente: Los Autores*

**Grafico 12:** Resistencia a la compresión del material de agregado grueso muestra YM2



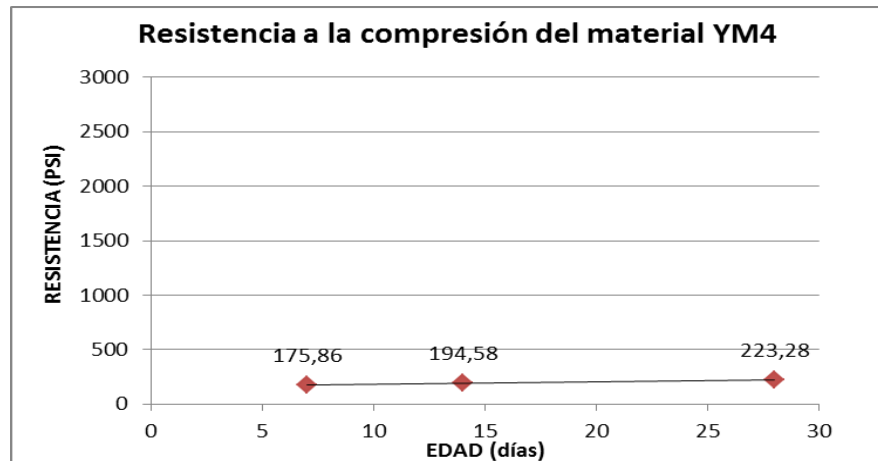
*Fuente: Los Autores*

**Grafico 13:** Resistencia a la compresión del material de agregado grueso muestra YM3



Fuente: Los Autores

**Grafico 14:** Resistencia a la compresión del material de agregado grueso muestra YM3



Fuente: Los Autores

## 6. CONCLUSIONES

Después de realizado el análisis petrográfico el contenido de sílice en las muestras nos indica que existe una alta posibilidad que la reacción álcali\_sílice pueda presentarse. El mayor contenido de sílice (minerales de cuarzo) se presenta en la muestra Yp3 (Yeso), aunque nuestro estudio se enfoco en los materiales residuales (Lutitas), el conteo realizado a las muestras revelo que por las cantidades de fases de los silicatos presentes en las muestras, estas no tendrían cabida dentro de la industria de la construcción por la alta posibilidad que se presente la reacción álcali-sílice.

El agregado grueso generalmente tiene niveles de absorción (contenido de humedad a superficie seca saturada) que varían del 0.2% al 4%. Por lo que el porcentaje de absorción de la muestra de estudio se encuentra dentro del rango permitido con un 1,41% para las Lutita compactas. Estas propiedades físicas propias de cada agregado son importantes a la hora de pensar sus posibilidades dentro de la industria de la construcción.

Las cenizas de la roca es un elemento analítico que equivale al residuo inorgánico que queda después de quemar la materia orgánica contenida en la muestra, para nuestro caso este valor correspondió a 92,12% lo que nos indica que existía poca cantidad de materia orgánica y que en su mayoría los residuos están compuestos de minerales formadores de roca.

El análisis de rayos infrarrojos (espectrofotómetro de infrarrojo) hecho a la muestra corrobora que existía un porcentaje de elementos orgánicos bajos en la muestra, como pudo determinarse con el cálculo de cenizas, los compuestos minerales representativos de la muestra según el análisis fueron: Cuarzo, Feldespato, Micas, lo que nos demuestra una vez más que si el material llegase a usarse como agregado grueso en la industria de la construcción podría presentar la reacción álcali- sílice, lo cual como sabemos representaría un problema.

Las pruebas de difracción de rayos x (DRX) arrojaron que las muestras presentaban fases de minerales potencialmente reactivos con el álcali del cemento ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)_2(\text{OH})_4$ ,  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ,  $\text{K}_{0.92}\text{Na}_{0.08}\text{Al}_{1.78}\text{Fe}_{0.22}(\text{Al}_{0.82}\text{Si}_{3.18}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ , principalmente) aunque se le hizo este análisis a las tres muestras presentes en la mina las fases de nuestro interés fueron las de la muestra YP1 ya que este fue el material residual considerado para las pruebas mecánicas y de resistencia por presentarse en bloques compactos.

El estudio de la reactividad potencial álcali-sílice en los agregados, es un parámetro que debe ser tenido en cuenta en términos de la durabilidad del concreto, pues como pudo estudiarse la expansión que puede generar o no agrietamiento provocado por la reacción puede afectar directa y negativamente las estructuras generando el que la vida útil de estas a base de concreto se vea gravemente acortada. El análisis del porcentaje de sílice por el método gravimétrico revela que la muestra contiene un alto porcentaje (61.08%) de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), ya que está contiene gran cantidad de minerales del grupo de los silicatos, tales como anfíboles, plagioclasas, cuarzo, entre otros, los cuales tienen en su estructura los elementos de Si y O. Por lo anterior la muestra en su composición excede más del 50% en sílice existiendo la probabilidad de que ocurra una reacción con los álcalis contenidos en el cemento.

Al obtener los resultados de resistencia de las probetas, la resistencia que se deseaba tener según lo presupuestado desde un principio era 21 MPa o 3000 psi, al observar los resultados obtenidos a los 14 días por experiencia en los laboratorios a éste tiempo ya debe tener una resistencia del 80% del valor inicial (3000 psi) esto quiere decir 2400 psi y para este tiempo el mayor valor obtenido es de 1273,14 psi para la muestra YM2, lo que quiere decir que no ha alcanzado ni el 50% del valor que se supone sería el ideal, y para los 28 días por experiencia el material debe tener una resistencia del 95 % del valor inicial (3000 psi) esto quiere decir 2850 psi y para este tiempo el mayor valor obtenido es de 1711,76 psi. En

conclusión con estos datos obtenidos se demuestra que el material utilizado para la realización de las probetas no cumple con las condiciones presupuestadas inicialmente, puesto que a los 28 días no alcanza ni el 50% del valor que se debería obtener. Por lo tanto este material es obsoleto para ser utilizado en mezclas de concreto.

## 7. RECOMENDACIONES

Realizar nuevas pruebas al material residual, pues aunque nuestros estudios arrojaron que este no se recomendaba en la industria de la construcción, vale la pena en términos ambientales y económicos buscar darle un uso ya sea combinándolo con otro tipo de material o variando las cantidades usadas en las pruebas mecánicas (probetas) en la búsqueda de mejores resultados.

Mediante el proyecto se busco abrir la puerta a los estudios de los residuos mineros, es compromiso de quienes participan en la explotación de materiales contextualizar el proyecto en términos impacto – beneficio, por tanto después de lo visto en la mina en la que se hizo el estudio es importante que las empresas dedicadas a la consecución de recursos no solo piensen en los lugares que han de adecuar para los desechos, sería bueno que le abrieran un espacio a las posibilidades que pueden tener estos materiales. Se recomienda entonces el que por decisión quienes tienen algún vínculo con los proyectos contemplen darle un lugar a la investigación no solo para el material objetivo, también a los residuos que pueda generar su exploración y posterior explotación.

## BIBLIOGRAFIA

Anónimo; Sedimentary Rocks: Picture Gallery of the Most Common Rock Types; Geology.com; Febrero Del 2013.

Bates, R. L. Y Jackson, J.A. (Eds). (1980). Glossary of Geology, 2<sup>nd</sup> Ed., American Geological Institute, Falls Church, Virginia, 1980.

Bauer, S; Et. Al; Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation in Concrete: A Literature Review, Austin, Texas; 2011.

Broekmans, M.; Petrography as an Essential Complementary Method in Forensic Assessment of Concrete Deterioration: Two Case Studies; Geological Survey of Norway, Department of Industrial Minerals and Metals, N-7491 Trondheim, Norway- Elsevier Inc.; 2008.

Chan J., Carcaño R., Moreno E. (2003) "Influencia De Los Agregados Pétreos En Las Características Del Concreto" Revista Ingeniería 7-2, Argentina, 2003, Pp. 39-46.

GALVIS, J. (1987) Evaporitas. Recursos Minerales De Colombia (Nº 1, Tomo II, Segunda Edición). Publicaciones Especiales Ingeominas, Bogotá, 82-100.

Instituto Del Concreto, (1997). Manual Tecnología Y Propiedades. Asociación Colombiana De Productores De Concreto. ASOCRETO, Tercera Reimpresión Colombia.

Katayamaa. T.; Tagamia., M. Alkali-Aggregate Reaction Under The Influence Of Deicing Salts In The Hokuriku District, Japan. Department Of Concrete

Lafarge; El Cemento Portland Puzolanico: Solución Para La Reactividad Alkali-Silice Y Otros Agentes Agresivos Al Hormigon; Folleto Técnico; Quito, Ecuador.

Maintenance, Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., 2-11-15 Mita, Minato-Ku, Tokyo 108-8337, Japan. June 2004.

Naranjo, C. Et. Al; Rocas Y Fósiles; 2009.

Pasquel, E. Reacción Álcali-Agregado: El VIH Del Concreto; Revista Noticreto, Perú; 2009

Ramos, J.; Agregados Del Yeso, 2008.

Sanz, A.; Desarrollo de un Modelo Teórico para la Interpretación de Difractogramas de Rayos X de Alta Resolución, Tesis Doctoral; Madrid, Julio de 1995.

Segarra. J; Envejecimiento De Presas Por Reacciones Expansivas En Hormigon; Universidad Politecnica De Cataluña, Departamento De Ingeniería De La Construcción, Julio Del 2005. Barcelona, España.

Tamrakar, N.; Paudel, L.; Petrographic Analysis Of Carbonate Rocks For Alkali-Aggregate Reactivity; Bulletin Of The Department Of Geology, Tribhuvan University, Kathmandu, Nepal, Vol. 14, 2011, Pp. 15–20.

Tamrakar, N.; Paudel, L.; Petrographic Examination Of Ledge Rocks Aided By Microscopic And X-Ray Diffraction Analyses For Alkali-Silica Reactivity; Bulletin Of The Department Of Geology, Tribhuvan University, Kathmandu, Nepal, Vol. 14, 2011, Pp. 21–28.

Touma. W. E.; ALKALI-SILICA REACTION IN PORTLAND CEMENT CONCRETE: TESTING METHODS AND MITIGATION ALTERNATIVES. Dissertation Presented To The Faculty Of The Graduate School Of The University Of Texas At Austin In Partial Fulfillment Of The Requirements For The Degree Of DOCTOR OF PHILOSOPHY. University Of Texas at Austin. August 2000.

Zaidi., S. M.; Rafeeegi., S.F.; Ali., M.S.; Aggregate Characterization - An Important Step Towards Addressing Construction Issues In Pakistan.; First International Conference On Construction In Developing Countries (ICCIDC-I)“Advancing And Integrating Construction Education, Research & Practice, Karachi, Pakistan. August 4-5, 2008.

Zhang, S.; Zhang, M.; Application Of Petrography For Determining The Quality Of Concretecured In Tropical Environment; Department Of Civil Engineering, The National University Of Singapore, 10 Kent Ridge Crescent- Cement And Concrete Research 35 (2005) 1377– 1384 Singapore; 2005.

## ANEXOS

### Anexo A: Picos Representativos del Espectro de Bandas del Análisis en el Espectrómetro de Masas

